

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2012

Bc. Veronika Zemanová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ
KATEDRA HODNOCENÍ TEXTILÍ



Studijní program: N 3108 Průmyslový management
Studijní obor: Produktový management

NÁVRH ČIDEL PRO MĚŘENÍ TLAKŮ
V HYPERELASTICKÝCH MATERIÁLECH

DESIGN OF SENSORS FOR MEASURING PRESSURES
IN HYPERPLASTIC MATERIALS

(KHT – 132)

Autor: **Bc. Veronika Zemanová**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Novák, Ph.D.**

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 69

Počet obrázků: 32

Počet tabulek: 12

Počet grafů: 14

Počet příloh: 1

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

P r o h l á š e n í

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala panu Ing. Ondřeji Novákovi, Ph.D. za poskytnutí mnoha cenných rad, připomínek a informací k vypracování této diplomové práce a za ochotný a milý přístup po celou dobu spolupráce. Dále bych chtěla poděkovat panu doc. Ing. Milanu Kolářovi, CSc. za přínosné odborné rady. V neposlední řadě děkuji své rodině a všem blízkým za trpělivost a podporu při studiu, bez nichž by text, který držíte v rukou, nemohl vzniknout.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem čidel pro měření tlaků v hyperplastických materiálech. Cílem práce bylo experimentálně určit, která z navržených čidel jsou vhodná pro praktické využití. V teoretické části byly popsány možnosti měření tlaku. Dále byl podán přehled hyperplastických materiálů, které mají schopnost odolávat deformačním vlivům a po zatížení se vrátit zpět do původního tvaru. Z tohoto přehledu byl vybrán materiál vhodný jako detektor velkých deformací a snadno měřitelná elektrická veličina, kterou lze deformaci popsat. Touto veličinou byl elektrický odpor. Praktická část zahrnuje experimenty, prostřednictvím nichž se u zkušebního vzorku pozoruje vliv změny teploty, relativní vlhkosti, relaxace napětí a hodnoty stlačení na elektrický odpor. Pro návrh snímačů elektrického odporu z vybraného materiálu, byla vyrobena testovací deska v podobě tištěného spoje. V závěru byla navržena idea uspořádání měřicího zařízení.

Klíčová slova:

Čidla, vodivá PU pěna, elektrický odpor, deformace, tlak

Annotation

This thesis describes the design of sensors for measuring pressures in the hyperplastic materials. The aim was to determine experimentally which of the proposed sensors are suitable for the practical use.

In the theoretical part the options of pressure measurement were described. It was given an overview of hyperplastic materials that have the ability to resist deformation effects and which can restore to their original shape after strain. For this survey were selected the material suitable as a detector of large deformations, and easily measurable electrical quantity which can describe the deformation. That variable was the electrical resistance. The practical part includes experiments through which it is possible to observe the test sample for the influence of temperature, relative humidity and pressure on electrical resistance. For the design of the sensors of electrical resistance of the selected material the testplate/board was made in the form of printed joint. In conclusion, the idea of measuring equipment arrangement was proposed.

Keywords:

sensors, conductive PU foam, electrical resistance, deformation, pressure

Obsah

Úvod	16
1. Rešerše	17
1.1. Možnosti měření tlaku	17
1.1.1. Tlakoměry se silovým účinkem	17
1.1.1.1. Pístový tlakoměr.....	17
1.1.2. Tlakoměry elektrické	18
1.1.2.1. Snímače s odporovými tenzometry	18
1.1.2.2. Pizoelektrické snímače tlaku	21
1.1.2.3. Kapacitní snímače tlaku.....	24
1.1.3. Deformační tlakoměry	25
1.1.3.1. Trubicové tlakoměry	25
1.1.3.2. Membránové tlakoměry	26
1.1.3.3. Krabicové tlakoměry	26
1.1.3.4. Vlnovcové tlakoměry.....	27
1.1.4. Vybraná zařízení pro měření kontaktního tlaku.....	27
1.1.5. Měřicí obvody	28
1.1.6. Inteligentní převodníky tlaku	30
1.2. Přehled materiálů použitých jako detektory velkých deformací	31
1.2.1. Pryž (guma)	31
1.2.2. Neopren	34
1.2.3. Silikon	36
1.2.4. PU pěny	37
2. Výběr materiálu vhodného pro použití v experimentální části	40
3. Elektrická veličina vhodná pro popis deformace zvoleného materiálu	40
3.1. Elektrický odpor	41
4. Experimentální část.....	42
4.1. Návrh a cíl experimentu	42
4.2. Použitá měřicí zařízení a pomůcky	43
4.3. Testovací deska pro výběr vhodné snímací elektrody	51
4.4. Popis testovaného vzorku	52
4.5. Návrh měřicího zařízení a postup vyhodnocování tlakového pole	53

4.6.	Přehled uspořádání experimentů	54
4.6.1.	Stanovení vlivu změny klimatických podmínek na hodnotu el. odporu PU pěny.....	54
4.6.2.	Stanovení relaxace napětí	55
4.6.3.	Výběr vhodné snímací elektrody.....	55
5.	Výsledky experimentu.....	56
5.1.	Závislost elektrického odporu na deformaci PU pěny	56
5.2.	Závislost odporu PU pěny na teplotě okolí	59
5.3.	Závislost odporu PU pěny na teplotě a relativní vlhkosti.....	61
5.4.	Stanovení relaxace napětí PU pěny.....	64
5.5.	Stanovení vlivu relaxace napětí PU pěny na hodnotu el. odporu	66
5.6.	Výběr vhodné snímací elektrody.....	67
6.	Diskuse a návrh	74
7.	Závěr.....	79
8.	Použitá literatura.....	82
	PŘÍLOHA	I

Seznam použitých symbolů a zkratek

obr.	-	obrázek
tab.	-	tabulka
el.	-	elektrické
aj.	-	a jiné
viz.	-	lze vidět
č.	-	číslo
např.	-	například
atd.	-	a tak dále
tj.	-	to je
R	-	elektrický odpor [Ω]
Ω	-	ohm
k Ω	-	kiloohm
V	-	Volt
mV	-	milivolt
p	-	tlak [Pa]
Pa	-	Pascal
MPa	-	megapascal
F	-	síla [N]
N	-	Newton
Q	-	elektrický náboj
min	-	minuta
sec	-	sekunda
S	-	obsah
Gp	-	tíha pístu
GM	-	tíha závaží
Kp	-	pizelektrická konstanta
Fx	-	rozložená síla
C	-	kapacita
U	-	elektrické napětí
X	-	elektrická osa
Y	-	mechanická osa

Z	-	optická osa
ϵ_0	-	permitivita vakua
ϵ_r	-	poměrná permitivita
2-D	-	dvojměrná
3-D	-	trojměrný
r.v.	-	relativní vlhkost
%	-	procento
d	-	vzdálenost
mm	-	milimetr
m ²	-	metr čtvereční
°C	-	stupeň Celsia
SBR	-	butadien-styren
BR	-	polybutadien
NBR	-	butadien-akrylonitril
IIR	-	isobutylene-isopren
CR	-	chloropren
IR	-	izopren
EPDM	-	etylen-polypropylen
PU	-	polyuretan
SI	-	silikon

Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1: Pístový tlakoměr

Obr. 1.2: Provedení tenzometrů

Obr. 1.3: Membrána tlakového snímače v nezatíženém stavu

Obr. 1.4: Snímače s polovodičovými tenzometry

Obr. 1.5: Schéma pizelektrického snímače

Obr. 1.6: Pizelektrický jev u krystalu křemene

Obr. 1.7: Charakteristický průběh kapacitního snímače tlaku

Obr. 1.8: Deformační prvky

Obr. 1.9: trubicový tlakoměr

Obr. 1.10: Vlnovcový tlakoměr

Obr. 1.11: Tenzometrický můstek

Obr. 1.12: Funkční schéma snímače tlaku s polovodičovými tenzometry

Obr. 1.13: Blokové schéma inteligentního převodníku

Obr. 1.14: Řez neoprenem pod elektronovým testovacím mikroskopem

Obr. 1.15: Neoprenové slaby

Obr. 1.16: Křivka napětí a deformace elastické pěny

Obr. 1.17: Struktura PU pěny

Obr 4.1: Přístroj pro získávání hodnoty elektrického odporu

Obr. 4.2: Trhací stroj Labtest 2.050

Obr. 4.3: Teplovzdušná komora

Obr. 4.4: Klimatizační zkušební skříň

Obr. 4.5: Diagram vlhkosti klimatizační zkušební skříně

Obr. 4.6: Skleněná deska s připevněným snímači elektrického odporu

Obr. 4.7: Testovací deska

Obr. 4.8: Zatěžovací těleso

Obr. 4.9: Elektricky vodivá PU pěna

Obr. 4.10: Blokové schéma elektrického zpracování odporového pole

Obr. 4.11: Grafické znázornění uspořádání zkušebního vzorku: A- skleněné zatěžovací těleso, B- PU pěna, C- elektricky nevodivá podložka

Obr. 4.12: Grafické znázornění uspořádání zkušebního vzorku: A- elektricky nevodivá podložka, B- PU pěna, C- paropropustná membrána, D- kovové zatěžovací těleso

Obr. 4.13: Grafické znázornění uspořádání zkušebního vzorku: A- testovací deska, B- PU pěna, C- paropropustná membrána, D- kovové zatěžovací těleso

Obr. 5.1: Uspořádání experimentu stanovení elektrického odporu v závislosti na stlačení

Obr. 5.2: Uspořádání experimentu stanovení relaxace napětí PU pěny

Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Parametry přístroje pro měření elektrického odporu

Tab. 2: Parametry trhačího stroje Labtest 2.050

Tab. 3: Parametry klimatizační komory

Tab. 4: Parametry nevodivé podložky

Tab. 5: Parametry jednotlivých navržených elektrod pro snímání tlaku

Tab. 6: Parametry zatěžovacích těles

Tab. 7: Parametry vzorku potahové textilie

Tab. 8: Parametry použitých polyuretanových pěn

Tab. 9: Procentuální vyjádření rozdílu elektrického odporu v závislosti na stlačení

Tab. 10: Procentuální vyjádření rozdílu elektrického odporu v závislosti na změně teploty okolí

Tab. 11: Procentuální vyjádření rozdílu získaných hodnot elektrického odporu PU pěn při teplotě okolí 22°C a 37°C v závislosti na změně relativní vlhkosti

Tab. 12: Procentuální vyjádření rozdílu získaných hodnot napětí PU pěn v závislosti na době zatížení

Seznam použitých grafů

Graf 1: Závislost hodnoty elektrického odporu PU pěny 6 mm na deformaci a době zatížení

Graf 2: Závislost hodnoty elektrického odporu PU pěny 15 mm na deformaci a době zatížení

Graf 3: Porovnání hodnot elektrického odporu PU pěn 6 mm a 15 mm závislého na deformaci

Graf 4: Srovnání hodnot elektrického odporu PU pěn závislého na změně teploty okolí

Graf 5: Porovnání hodnot elektrického odporu PU pěny 6 mm závislého na teplotě a relativní vlhkosti okolí

Graf 6: Porovnání hodnot elektrického odporu PU pěny 15 mm závislého na teplotě a relativní vlhkosti okolí

Graf 7: Porovnání relaxace napětí pěny 6 mm a 15 mm

Graf 8: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 6 mm a 15 mm během dlouhodobého zatížení

Graf 9: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 6 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do velkého obvodu

Graf 10: Porovnání stabilních hodnot elektrického odporu pěny 6 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do velkého obvodu

Graf 11: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 6 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do malého obvodu

Graf 12: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 15 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do velkého obvodu

Graf 13: Porovnání stabilních hodnot elektrického odporu pěny 15 mm během dlouhodobého

Graf 14: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 15 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do malého obvodu

Úvod

Pacienti s poškozeným pohybovým aparátem, trvale připoutáni k lůžku, lidé na vozíčku ... mimo zdravotních problémů, které zapříčinily tento stav, musí pacient a jeho lékař myslet také na prevenci výskytu dukubitu, neboli proleženiny. Ty vznikají v místě mezi podložkou a pokožkou pacienta vlivem působení lokálního tlaku. Jak již bylo zmíněno, tímto problémem trpí lidé neschopni vyvíjet větší či menší pohybovou aktivitu. Je známo, že pro tyto případy byly vyvinuty různé druhy antidekubitních pomůcek od malých, ošetřujících jednu konkrétní část těla, až po antidekubitní systémy, pečující rovnoměrně o celé tělo, kam se řadí například matrace.

Antidekubitní pomůcky jsou častým předmětem vědeckých studií a studentských prací. I tato diplomová práce se týká prevence vzniku proleženin. Jejím předmětem je výroba čidel pro měření tlaku v hyperplastických materiálech, která jsou pro matrace nejčastěji používány. V praxi by pak byla podložka s čidly umístěna pod matrací pacienta. Úkol čidel by spočíval ve snímání hodnot kontaktního tlaku s tím, že při překročení kritické hodnoty, tj. 4,27 kPa (32 mmHg), by přístroj upozornil obsluhu pacienta, že k této situaci došlo. Po překročení kritické hodnoty kontaktního tlaku je tedy nutno změnit polohu pacienta. Předpoklad, výhoda a také jeden z hlavních významů této podložky, je příznivá cena oproti antidekubitním systémům, a tedy snadnější dostupnost pro pacienta nebo lékařská zařízení.

Teoretická část zahrnuje rešerši zaměřenou na možnosti měření tlaku a materiálovou rešerši podávající přehled elastických materiálů. Z tohoto přehledu je dále vybrán materiál vhodný jako detektor velkých deformací a také elektrická veličina, na základě které lze snadno deformaci popsat. Dále je popsán návrh uspořádání čidla pro snímání kontaktního tlaku a měřicí zařízení pro výběr vhodné snímací elektrody.

Experimentální část práce se zabývá elektrickým odporem testovaného vzorku za určitých klimatických podmínek a během mechanického namáhání. Druhá část experimentu je zaměřena na výběr vhodných čidel, která by byla možno v praxi použít pro měření elektrického odporu na PU pěně.

1. Rešerše

Tato část diplomová práce je zaměřena na možnosti měření tlaků a sil. Dále je podán přehled elastických materiálů, ze kterého je vybrán materiál vhodný jako detektor velkých deformací.

1.1. Možnosti měření tlaku

Tlak vyjadřuje plošný účinek síly. Je určen diferenciálním podílem síly a plochy k ní kolmé.

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (1.1)$$

Hlavní jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Je to tlak vyvolaný silou o velikosti 1N rovnoměrně rozložené na ploše kolmé ke směru síly o rozměru 1m². Přístroje pro měření této fyzikální veličiny se souhrnně nazývají *tenzometry*. [1]

1.1.1. Tlakoměry se silovým účinkem

Měření tlaku je převáděno na měření síly. Její účinky jsou vyvažovány například pružinou či závažím.

1.1.1.1. Pístový tlakoměr

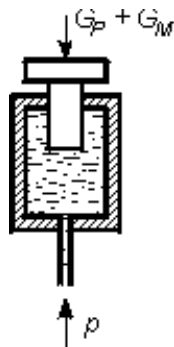
Jeho podstatnou součástí je píst přesného průřezu umístěný ve válci. Tlak je na píst přenášen olejem, kterým je celý systém vyplněn. Tíha pístu a závaží kompenzuje sílu vzniklou působením měřeného tlaku. V okamžiku, kdy se píst nepohybuje ve směru osy, je dosaženo rovnováhy. Pro měřený tlak p platí:

$$p = \frac{G_M + G_p}{S} \quad [\text{Pa}] \quad (1.2)$$

G_p ... tíha pístu G_M [N] ... tíha závaží S [m²] ... čelní plocha pístu

[1,2]

Píst nebo válec se musí otáčet, aby bylo dosaženo kapalinového tření mezi válcem a pístem. Kompenzační sílu vyvozenou závažím lze určit s vysokou přesností. Proto se těchto tlakoměrů využívá také pro ověřování a kalibraci deformačních tlakoměrů.



Obr. 1.1: Pístový tlakoměr [2]

Rozsah měření pístovými tlakoměry je od 0.05 do 2 000 MPa i více.

[1,2]

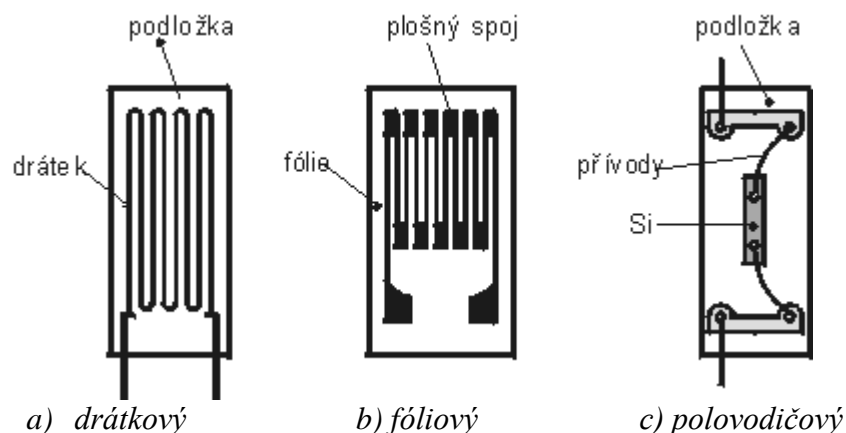
1.1.2. Tlakoměry elektrické

Do této skupiny patří snímače tlaku poskytující elektrický výstupní signál. Jedná se o moderní a perspektivní snímače doplněné moderními elektronickými vyhodnocovacími obvody.

1.1.2.1. Snímače s odporovými tenzometry

Tenzometr je jeden z nejdůležitějších prvků techniky elektrického měření, u něhož se využívá **piezorezistivního jevu** (schopnost krystalu generovat el. napětí při jeho deformování). Snímá mechanické veličiny jako je pnutí (povrchové napětí), síla, hmotnost atd., které se pak mění na elektrický odpor, který pak může být měřen. Odpor se mění vlivem působící síly. Povrchové napětí obsahuje tah i stlačení (přítlak), rozlišují se kladným a záporným znaménkem. Díky tomu jsou tenzometry používány pro snímání rozeprutí (expanze) i smrštění (kontrakce). Provedení tenzometrů je znázorněno na obrázku 1.2.

[3, 5]



Obr. 1.2: Provedení tenzometrů [2]

Vlivem mechanického namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů a polovodičů ke změnám elektrického odporu, které jsou dány změnami geometrických rozměrů a krystalografické orientace. Pružné deformace představují síly vyvolané zpravidla tlakem nebo tahem. Deformace tělesa jsou způsobeny působením vnitřních nebo vnějších sil.

Pro měření sil a dalších odvozených veličin (moment, tlak, zrychlení, vibrace, posunutí aj.) lze vyvinout speciální převodníky. Převodník je obvykle opatřen membránou citlivou na tlak, na které jsou tenzometry nalepeny.

Pro vyhodnocení tenzometrických měření se nejčastěji používá zapojení tenzometrů do Whatstoneova můstku (viz. kap. 1.1.6). [1, 3, 5]

Kovový odporový tenzometr (drátkový a fóliový)

Drátkový tenzometr (1.2a)

Tento typ tenzometru je vyroben z odporových drátků o průměru 0.02 až 0.05 mm. Ve tvaru mnohonásobné vlásenky jsou tyto drátky nalepeny na tenký podklad z plastické hmoty nebo papíru, přičemž jsou konce připájeny na silnější vývody. Kompletní tenzometrický snímač je na měřenou součást přilepen speciálním lepidlem. [1, 3, 5]

Nalepovací fóliový tenzometr

Tento typ tenzometru tvoří vodiče o průměru 0,025 mm uložené mřížkové, které jsou přilepené přímo na zatěžovaný povrch pomocí epoxidového lepidla a tenké podložky. Vlivem působící síly na povrch je změněna délka povrchu a tím i nalepeného drátového odporu. Elektrický odpor se lineárně mění s deformační silou. U tohoto tenzometru je důležitá shodná roztažnost adhezivního lepidla a fólie. Lepidlo musí plnit funkci elektrické izolace mezi drátky tenzometru a povrchem, a s fólií musí společně pracovat při přenosu napětí (pnutí).

Fóliové tenzometrické snímače (obr. 1.2b) jsou vyráběny shodným postupem s výrobou plošných spojů (odleptáváním tenké odporové fólie). Tyto tenzometry mají složité tvary (radiální, spirálové, aj.). [1, 3, 5]

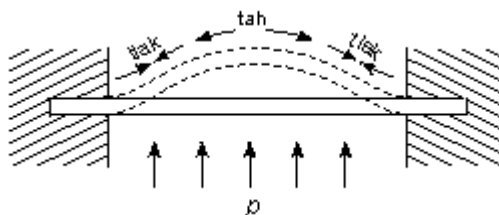
Polovodičový tenzometr

Tenzometry polovodičové (obr. 1.2c) ve formě pásků jsou vyráběny z křemíku technologií řezání, broušení, leptání monokrystalu, nebo planární technologií na křemíkovém nebo jiném substrátu. Tenzometry z monokrystalu jsou lepeny na fenolformaldehydovou podložku, nebo na samotný měřicí mechanický člen. Ke změně elektrické vodivosti dochází působením mechanického namáhání v určité ose monokrystalu polovodiče nebo v difúzní vrstvě polovodiče. Změna odporu je závislá na typu polovodiče. Polovodičové tenzometry vykazují nelineární závislosti odporu na teplotě i na deformaci. Tyto tenzometry jsou mnohem citlivější v porovnání s tenzometry kovovými.

Kombinací různých tenzometrů se mohou vytvářet můstky se zvýšenou citlivostí.

Základem snímače tlaku s difundovanými polovodičovými tenzometry je čidlo, které je převodníkem tlaku na elektrický signál. Podstatnou součástí je kruhová křemíková membrána vetknutá do pouzdra válcového tvaru. Membrána je současně pružným elementem pro snímání tlaku (na jejím povrchu jsou vytvořeny polovodičové tenzometry).

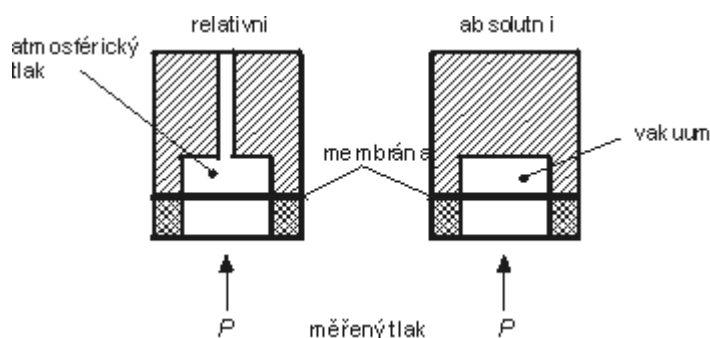
[1, 2, 3, 5]



Obr. 1.3: Membrána tlakového snímače v nezatíženém stavu [2]

Obrázek č. 1.3 schematicky znázorňuje řez membránou. Kruhová membrána o průměru asi 5 mm, vetknutá do obvodu, je namáhána tlakem rovnoměrně rozloženým po celé ploše. Na obrázku je zakreslena membrána v nezatíženém stavu a čárkovaně znázorněna ve stavu zatíženém tlakem p . V zatíženém stavu je možno identifikovat místa povrchového napětí v tlaku. Napětí povrchových vláken se měří tenzometricky.

Vhodné uspořádání snímačů s polovodičovými tenzometry na měřicí membráně, je zřejmé z obrázku č. 1.4. Takovéto uspořádání lze použít pro měření absolutního tlaku, podtlaku, přetlaku či tlakové difference.



Obr. 1.4: Snímače s polovodičovými tenzometry [2]

[2, 3, 5]

1.1.2.2. Pizoelektrické snímače tlaku

Snímač tvoří krystalový výbrus opatřený vodivými elektrodami. Při působení neelektrické veličiny má snímač vlastnosti generátoru náboje. Představuje zdroj napětí s velkým vnitřním odporem, jelikož dielektrikum má značný izolační odpor. Náboj, vznikající při působení měřené veličiny, je převáděn na napětí. [3]

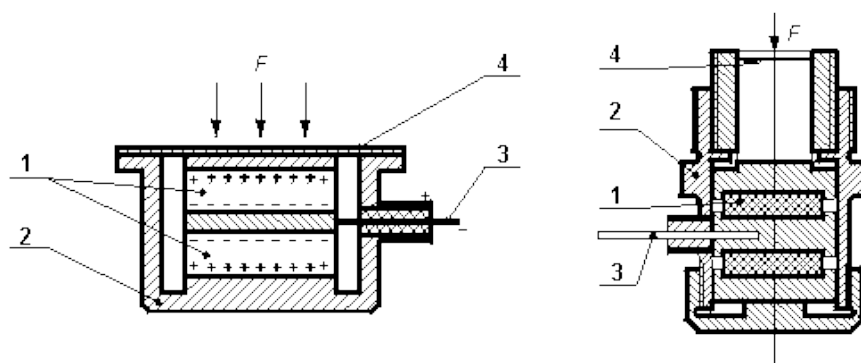
Výstupní napětí je dáno vztahem:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{K_p F_x}{C} \quad (1.3)$$

U... výstupní napětí snímače

C... kapacita čidla včetně převodů

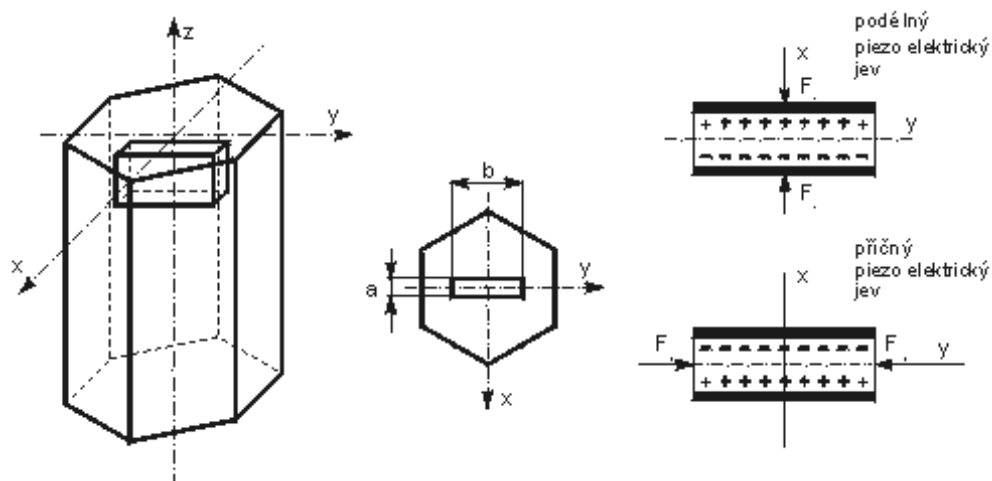
Jelikož je výstupní napětí snímače poměrně vysoké, nelze k měření použít přímo indikační měřicí přístroj. Pro impendanci přizpůsobení je tedy mezi snímač a měřicí přístroj zařazován zesilovač s velkým vstupním odporem. Běžně se využívají obvody realizované s tranzistory řízenými elektrickým polem. [1, 2]



Obr. 1.5: Schéma pizelektrického snímače [2]

Snímač obsahuje dva proti sobě zapojené pizelektrické krystaly (1), jejichž náboje se sčítají. Kryt snímače (2) vytváří elektrické i magnetické stínění a je vodivě spojen s vnějšími elektrodami obou krystalů. Centrální elektroda (3) je vedena izolační průchodkou. Membrána (4) zprostředkovává přenos tlakové síly na krystal.

Působením mechanických sil dochází u některých druhů krystalů ke vzniku elektrického náboje. Krystal se mechanicky rozkmitá přiložením střídavého proudu. Uvedené vlastnosti vykazuje například křemen, titaničitan barnatý a olovnatý a některé makromolekulární látky. [2, 3]



Obr. 1.6: Pizoelektrický jev u krystalu křemene [2]

Pizoelektrický element: z krystalu křemene (obr. 1.6) se vyřízne destička, jejíž hrany budou rovnoběžné s jednotlivými osami krystalu (X- osa elektrická, Y- osa mechanická, Z- osa optická).

Předností krystalu je lineární statická charakteristika, velký měřicí rozsah daný mechanickou pevností krystalu a široké teplotní rozmezí.

Vznik elektrického náboje

Krystal se zelektrizuje při působení síly kolmo na optickou osu. Na plochách kolmých na osu elektrickou pak vzniká elektrický náboj.

- ***Podélný pizoelektrický jev***

Vzniká působením rovnoměrně rozložené síly F_x na křemennou destičku podél elektrické osy X (obr. 2). Na každé stěně, kolmé k elektrické ose vzniká náboj Q (nezávisí na rozměrech krystalů), pro který platí vztah:

$$Q = K_p \cdot F_x \quad (1.4)$$

K_p ...pizoelektrická konstanta - pizoelektrický modul ($C \cdot N^{-1}$)

[1, 2, 3]

- *Příčný pizelektrický jev*

Vzniká působením síly F_y na krystal ve směru mechanické osy Y. Na plochách kolmých na elektrickou osu vznikají náboje, jejichž velikost závisí na geometrických rozměrech krystalu, směr polarizačního vektoru je záporný. Velikost náboje Q je dána níže uvedeným vztahem, kde b , a jsou rozměry destičky (obr. 1.6).

$$Q = -K_p F_y \frac{b}{a} \quad (1.5)$$

1.1.2.3. Kapacitní snímače tlaku

Základem kapacitního snímače je dvou či víceelektrodový systém. Jeho parametry se mění vlivem působení měřené neelektrické veličiny. Pro jednoduchý deskový kondenzátor je kapacita C dána vztahem:

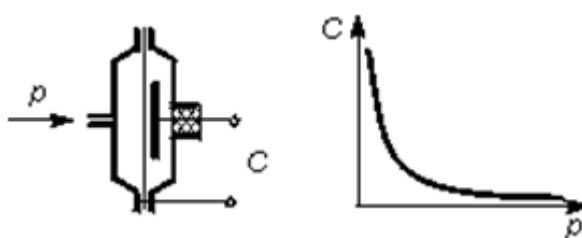
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (1.6)$$

S ... plochá elektroda

ϵ_0 ... permitivita vakua

d ... vzdálenost elektrod

ϵ_r ... poměrná permitivita

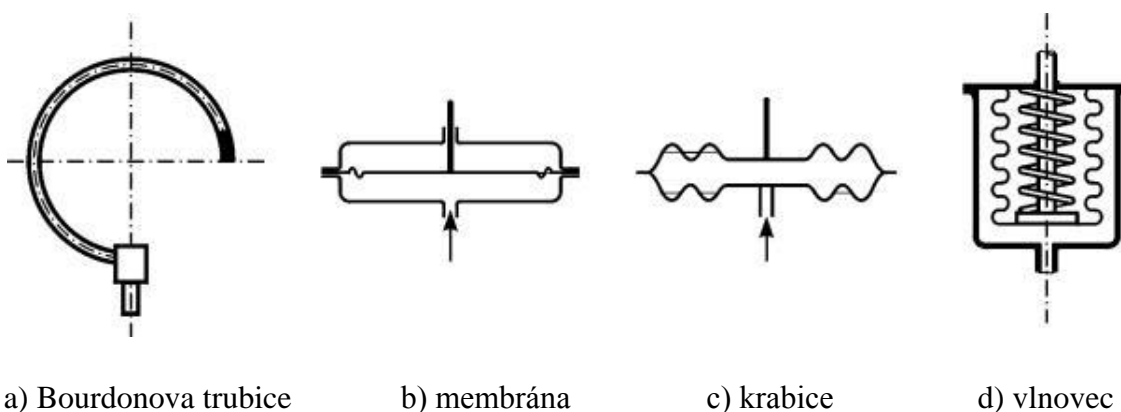


Obr. 1.7: Charakteristický průběh kapacitního snímače tlaku [2]

Vzdálenost mezi deskami, plocha desek či dielektrikum se mění působením neelektrických veličin. Pro měření tlaku je používán kapacitní snímač, u kterého se mění vzdálenost mezi deskami. Obrázek 1.7 znázorňuje nelineární průběh charakteristiky. Jedná se o hyperbolickou závislost (změny kapacity a citlivost budou největší při malých hodnotách d). [1, 2, 3]

1.1.3. Deformační tlakoměry

Princip deformačních tlakoměrů spočívá v pružné deformaci a ve změně geometrického tvaru vhodných tlakoměrných prvků způsobenou měřením tlaku. Obrázek č. 1.8 znázorňuje deformační prvky- Bourdonova trubice, membrána, krabice a vlnovec. Tyto elementy jsou nejčastěji vyráběny z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi a fosforového nebo beryliového bronzu.

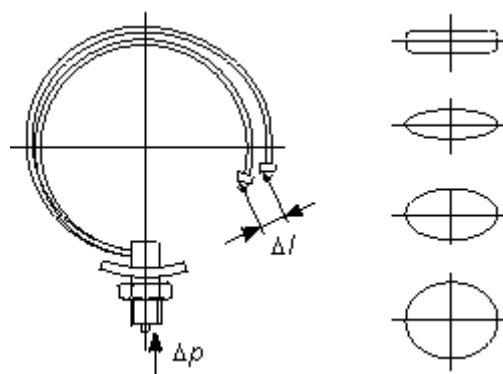


Obr. 1.8: Deformační prvky [2]

[3,7]

1.1.3.1. Trubicové tlakoměry

Tlakoměrným prvkem je v tomto případě Bourdonova trubice. Proto jsou trubicové tlakoměry též známy jako tlakoměry Bourdonovy. Trubice eliptického průřezu je stočena do kruhového oblouku (obr. 1.8a), šroubovice nebo spirály. Jedním koncem je pevně spojena s tělesem, které je opatřeno závitem pro měření tlaku a druhý- volný konec trubice je uzavřen a spojen přes převodové ústrojí s ukazatelem na stupnici. Působením tlaku se eliptický průřez mění v kruhový a zakřivení oblouku, do kterého je trubice stočena, se zvětšuje. Pro nízké tlaky je trubice mosazná s plošším průřezem, pro tlaky vysoké ocelová a profil se blíží kruhovému (obr. 1.9b). Přístroje měří v rozsahu od 0,5 MPa do 2 000 MPa a slouží také k měření podtlaku. [1, 2, 3]



a) schéma

b) průřez trubice

Obr. 1.9: trubicový tlakoměr [2]

1.1.3.2. Membránové tlakoměry

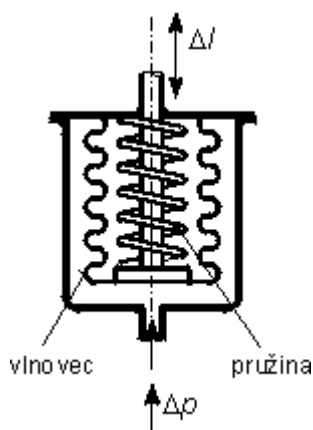
Jako tlakoměrný element je zde používána kovová membrána kruhového tvaru zvlněná soustřednými kruhy (obr. 1.8b). Membránu svírají dvě příruby, z jedné strany je přiváděn měřený tlak vyvolávající průhyb membrány, který je přenášen na ukazatel. Závislost zdvihu na tlaku je téměř lineární. Tlakoměry se vyrábí pro tlaky do 4 MPa, jsou citlivější než tlakové trubicové a jsou vhodné pro měření velmi rychle pulsujících tlaků. Pro nízké tlaky se používají pryžové membrány s textilní vložkou s kovovými příložkami. Deformační prvek tvoří pružina z ocelového drátu. Měření tlakových diferencí je možné přivedením tlaku na obě strany membrány. Membrána snímače je velmi tenká, má malý průměr, její deformace jsou snímány elektricky (kapacitně, indukčně, piezoelektricky), ochranu proti korozi poskytuje povlak nebo fólie z vhodného materiálu. [2]

1.1.3.3. Krabicové tlakoměry

Měřicím prvkem je krabice ze dvou zvlněných membrán o průměru 50 až 100 mm (obr. 1.8c). Používají se k měření malých přetlaků, podtlaků či tlakových diferencí. Deformace je přenášena na ukazatel pákovým převodem. Rozsah měření je 10 Pa až 1 000 Pa, spojením několika krabic v jeden celek je možno zvýšit citlivost. [1, 2]

1.1.3.4. Vlnovcové tlakoměry

Vlnovec- tenkostěnný kovový měch, je umístěn v pouzdře, do kterého je přiváděn měřený tlak. Tyto tlakoměry (obr. 1.10) se používají pro měření přetlaků a tlakových diferencí do 0,4 MPa. Deformace vlnovce je na ukazatel přenášena táhlem. Tuhost vlnovce (odolnost vůči deformaci) lze zvětšit vložením pružiny. Při měření tlakové difference je větší tlak přiváděn do pouzdra a menší do vlnovce. Při použití měchu z umělé hmoty je deformačním prvkem pružina. Kovové vlnovce s pružinou se používají v regulační technice (pneumatické vysílače, převodníky, přijímače apod.).



Obr. 1.10: Vlnovcový tlakoměr [2]

[1, 2, 3]

1.1.4. Vybraná zařízení pro měření kontaktního tlaku

Měření kontaktního tlaku na matracích XSensor

Toto zařízení bylo navrženo konkrétně pro měření tlaku mezi fyziologickou zátěží (pacientem) a matrací. Měřicí zařízení nesmí svou přítomností mezi zátěží a matrací ovlivnit měřené hodnoty. Zařízení pracuje na kapacitním principu. Kompresní namáhání způsobuje změnu dielektrické konstanty mezi elektrodami. Tato změna je dle příslušné kalibrace dále převedena na hodnotu tlaku. [21, 62]

Elektrody jsou realizovány napříč přeloženými vrstvami, v nichž jsou umístěny ploché vodiče ze stříbra. Vložený elastomer zajišťuje nevodivou separaci elektrod. Přístroj má vysokou splyvavost a zanedbatelnou tažnost. Zařízení svou zanedbatelnou tloušťkou ovlivňuje hodnoty kontaktního tlaku a stává se další vrstvou v měřené skladbě materiálů.

[21]

Měření kontaktního tlaku na podložkách Tekscan

Podložka Tekscan měří rozložení tlaku lidského těla působícího na podpůrnou plochu (např. matrace nebo sedačka). Tento tenkovrstvý snímač síly a tlaku pracuje na piezorezistivním principu. Zařízení vyžaduje shodu rozměrů s testovaným objektem. Kombinací těchto faktorů je možno přesně měřit velikost tlaku a snímat jeho celkové rozložení. Snímač se skládá ze dvou vrstev. Každá vrstva je tvořena elastickou polyesterovou podložkou, na které jsou nalepeny snímací elektrody. Zařízení je tedy tvořeno snímací Tekscan elektronikou a softwarem pro zpracování a analýzu dat. Data jsou ze snímače shromažďována pomocí elektroniky a následně zpracována a odeslána pomocí bezdrátového připojení do počítače. Systém umožňuje zachytit a zobrazit dynamický tlak, zaznamenat výstup tlaku v reálném čase a data v podobě 2-D a 3-D obrázků. Dále má software funkci zobrazit křivky tlaku a síly v časovém průběhu, centrum síly a jeho trajektorii. Systém také umožňuje zobrazit a porovnat více testů najednou.

[22]

1.1.5. Měřicí obvody

Aby bylo možné měřit deformační sílu (napětí), musí být připojeny k elektronickému obvodu, který je schopen odpovídat změny zaznamenávat. Převodníky pro tenzometr mají většinou vstupy pro čtyři tenzometry, které jsou elektricky spojeny do Wheatstoneova můstku (obr. 1.11).

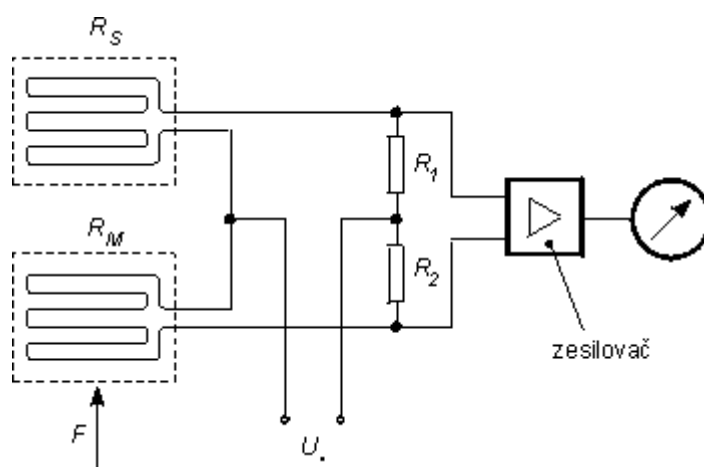
Wheatstoneův můstek

Je používán pro vyhodnocení tenzometrických měření. Je to dělený můstek, který je používán pro měření statického i dynamického elektrického odporu.

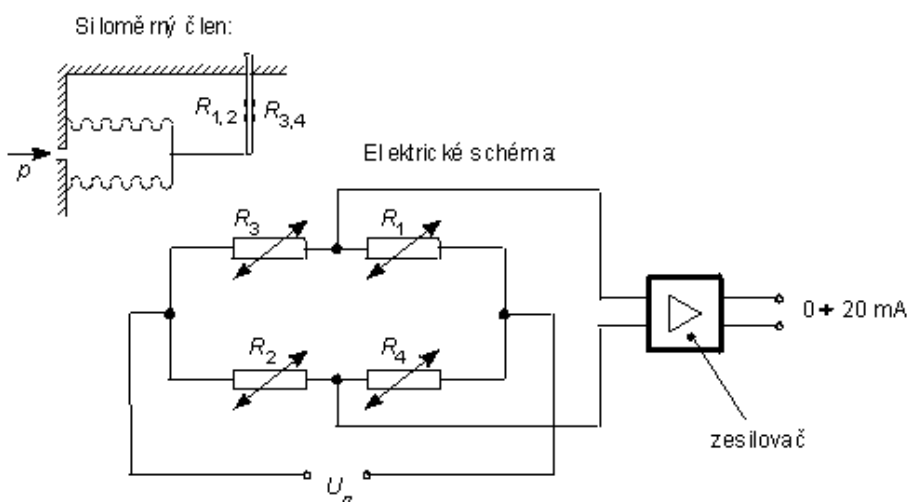
[6]

Správné umístění tenzometrů do snímače a vhodné uspořádání tenzometrů do měřicího můstku zvyšuje citlivost měření, potlačuje vliv veličin a nelinearitu snímače.

Výstupním napětím se vyjadřuje v mV na Volt napájecího napětí [mV/V]. Wheatstoneův můstek je také vhodný pro tepelnou kompenzaci. Počet aktivních tenzometrů, připojených do můstku, závisí na aplikaci. Na obrázku 3 je uveden příklad základního zapojení. [2, 5, 6]



Obr. 1.11: Tenzometrický můstek [2]

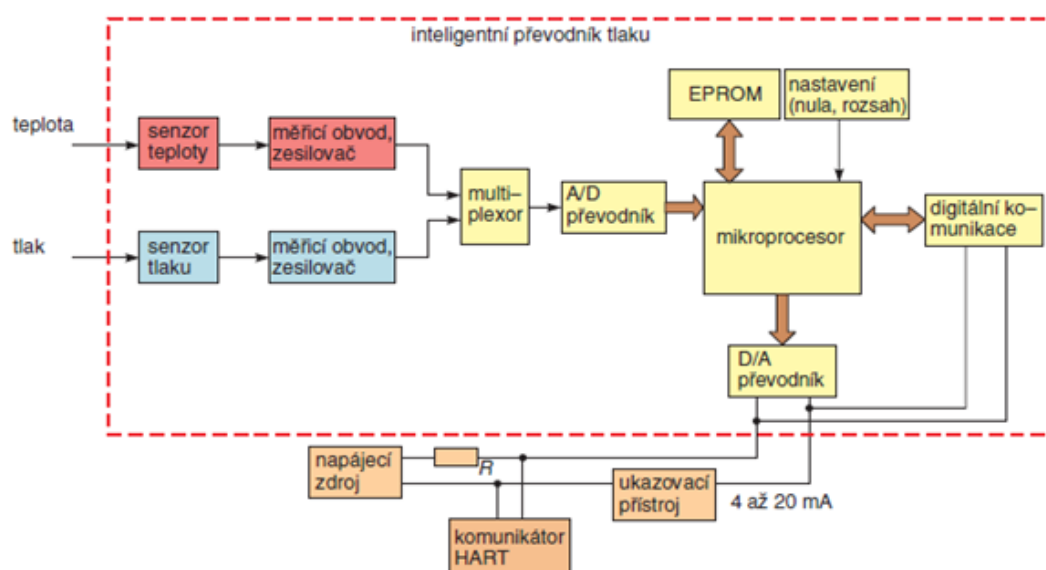


Obr. 1.12: Funkční schéma snímače tlaku s polovodičovými tenzometry [2]

Na každé straně nosníku siloměrného členu jsou nalepeny dva polovodičové tenzometry zapojené do měřicího můstku. Při působení síly, která je vyvolána vlivem působení tlaku, jsou tenzometry R1 a R2 namáhány na tah, a tenzometry R3 a R4 na tlak. Tenzometry namáhané stejným směrem, jsou umístěny v protilehlých větvích můstku. Ve srovnání s použitím jednoho tenzometru, je výsledná citlivost čtyřnásobná. [2, 5, 6]

1.1.6. Inteligentní převodníky tlaku

U inteligentních převodníků (*smart převodníků*) se využívají senzory s elektrickým principem převodu. Zpracování signálu je realizováno mikroprocesory a miniaturními obvody, které ukládají důležité údaje do paměti. Jedná se o údaje o měřicím rozsahu, nastavení měřicích hodnot pro signalizaci, kalibraci aj. Konfigurovatelnost podle požadavků uživatele je důležitou vlastností inteligentních převodníků. K dálkovému přenosu lze využít unifikovaný analogový nebo digitální signál.



Obr. 1.13: Blokové schéma inteligentního převodníku [4]

Obrázek č. 1.13 zobrazuje schéma inteligentního převodníku tlaku. Senzor tlaku reaguje na změnu tlaku v závislosti na principu, např. změnou odporu nebo kapacity. Tato změna je transformována na změnu napětí, které je v zesilovači zesíleno na požadovanou úroveň. Vztah mezi měřeným tlakem a změnou napětí je obecně nelineární. Velikost signálu je ovlivněna změnou teploty. [2, 4]

Pro inteligentní převodníky je typické umístění senzoru a elektronických obvodů v těsné blízkosti do společného pouzdra. Pro některé úlohy jsou k dispozici bezdrátové převodníky představující moderní technické prostředky pro řízení technologického procesu. Nevýhodou je však jejich relativně vysoká cena. [2, 4]

1.2. Přehled materiálů použitých jako detektory velkých deformací

Tato rešerše podává přehled materiálů mající elastické vlastnosti, a tedy teoreticky připadají v úvahu jako bezkontaktní snímače kontaktního tlaku. Toto čidlo má za úkol zabránit tvorbě proleženin u ležících pacientů.

Za elastický materiál je považováno takové těleso, jež se působením vnějších sil deformuje, ale po odstranění této síly se vrací do původního tvaru.

1.2.1. Pryž (guma)

Meziproduktem při samotné výrobě pryže je *gumárenská směs*- složitá disperzní soustava přísad homogenně rozptýlených nebo i rozpuštěných v základní surovině, kaučuku. Gumárenská směs nesmí být během přípravy v kontaktu s vodou. Pryž je materiál získaný z *přírodního* nebo *syntetického latexu*. Fyzikální vlastnosti umělého latexu jsou velmi podobné přírodnímu kaučuku.

- V případě ***přírodního kaučuku*** mluvíme o složce mléčné šťávy (latexu) kaučukovníku. Pomocí kyselin se tvoří surový kaučuk, ze kterého se stává po přidání síry guma připravená k dalšímu zpracování.
- V době 2. světové války byla vyvinuta technologie výroby ***syntetického kaučuku***. Ten se dělí dle způsobu zpracování, vlastností a použití následovně:

butadien-styrenový (SBR)- je vhodný pro všeobecné použití, jeho pevnost je nižší než u přírodního kaučuku a odolnost proti stárnutí za zvýšených teplot vyšší

polybutadienový (BR)- v kombinaci s přírodním kaučukem tvoří tvrdou pryž s lepší odolností proti oděru, používá se např. pro běhouny pneumatik [24, 25, 26]

butadien-akrylonitrilový (NBR)- odolává bobtnání, vzdoruje olejům a rozpouštědlům, horší odrazová pružnost a nižší mrazuvzdornost

butyl kaučuk (isobutylene-isoprenový) (IIR)- nízká odrazová pružnost, chemicky i tepelně odolný, nepropustný pro plyny

chloroprenový (CR)- vysoká odolnost proti stárnutí v ozonu, snížená hořlavost, dobrá nepropustnost pro plyny, odolný vůči olejům a benzínu, patří sem např. neopren

izoprenový (IR)- stejné chemické složení jako přírodní kaučuk, snadná zpracovatelnost

etylen-polypropylenový (EPDM)- vysoce odolný proti stárnutí (oxidaci) a chemickým vlivům

silikonový (SI)- vysoce odolný vůči teplotám (-70 a +250°C), odolný proti stárnutí a ozonu, je chemicky zdravotně nezávadný, vysoce elektricky pevný

polyuretanový (PU)- vysoká pevnost, houževnatost, odolnost proti oděru, oleji, ozonu

thiokolový- vysoká odolnost proti bobtnání

fluorokaučuky- skupina kaučuků s vysokou pevností vůči olejům, teplu a agresivním chemikáliím

Problém s využitím odpadu opotřebovaných pryžových výrobků se řeší výrobou *regenerátu* (drtě), jež má za úkol zlepšovat zpracovatelnost směsí. Oproti tomu však snižuje mechanické vlastnosti vulkanisátů. [24, 25, 26]

Složky gumárenské směsi:

Vulkanizační prostředky- svým chemickým účinkem způsobují změnu ve struktuře uhlovodíkových řetězců, (síra, popřípadě donory síry- při vulkanizaci síru uvolňují, organické peroxidy, oxidy kovů, syntetické pryskyřice)

Urychlovače vulkanizace- regulují a nastavují vulkanizační proces, ovlivňují ekonomiku výroby a výsledné hodnoty pryže, dělí se dle účinku na pomalé, střední, rychlé, velmi rychlé, ultraurychlovače, urychlovače se zpožděným účinkem, (N- sulfonamidy)

Aktivátory vulkanizace- zlepšují účinnost urychlovačů, oxidy kovů, organické látky, (oxidy kovů, organické látky) [24, 25, 26]

Retardery- svou kyselostí snižují vulkanizační rychlost, mohou být nahrazeny urychlovači se zpožděným účinkem, (kyselina benzoová, anhydrid kyseliny fialové)

Plniva- ovlivňují tvrdost, pevnost, strukturní pevnost, modul a oděr vulkanizátu (oxid hořečnatý, byryt, křída, kaolin, křemičitá plniva)

Změkčovadla- kapalná nebo tuhá látky, zlepšují zpracovatelnost a elastické vlastnosti výrobků, zvyšují lepivost, zlepšují mrazuvzdornost, chrání před stárnutím

- Ropného původu- ozokerin, ceresin, minerální oleje, parafin
- Syntetické pryskyřice- koresin, rubserin
- Rostlinného původu- kalafuna, smrkový dehet, fakis
- Organické estery- dioktylfthalát, dibutylsebakát, dibutylfthalát

Antioxidanty- omezují přirozené stárnutí pryže (vliv ozonu, světla, kyselin, dynamického namáhání aj.), 50% uhlík

Peptisační činidla- změkčují kaučuk, urychlují plastifikační proces

Barviva, pigmenty- pro přípravu barevných směsí (červen H, kadmiová žlut, vulkánová organická barviva aj.)

Nadouvadla- pro směsi pro houbovou nebo mechovou pryž, při vulkanizaci dutých předmětů (míče, hračky), vysoké teploty je rozkládají na plynné látky, organický či anorganický původ

Separační prostředky (práškovala)- zamezují lepení kaučuku a jeho směsí při vulkanizaci, manipulaci a skladování, (křída, slída, škrob, brusný prach z pryže příslušné skupiny aj.)

Před samotným procesem výroby pryže je kaučuk předeheřt na 60°C po dobu 24 hodin. Přírodní kaučuk je za působení kyslíku mechanicky zpracován lámáním. Tak dochází ke štěpení molekul kaučuku a snížení molekulové hmotnosti = zvýšení plasticity. Z připravených surovin je vytvořena homogenní směs, přičemž je kladen důraz na teplotu, pořadí a množství přísad a dobu promíchávání jednotlivých složek. Míchání se provádí na dvouválcových kalandrech, kdy jsou válce chlazeny vodou, ve hnětacích strojích, nebo na rotomilech. Dále směs dostává tvar a rozměry vhodné pro další zpracování (vulkanizaci, konfekci apod.). [24, 25, 26]

Vulkanizace

Kromě směsí pro přípravu lepidel se vulkanizují všechny gumárenské směsi. Během vulkanizace dochází k vzájemnému působení různých přísad. Díky tomuto procesu nastává několik změn:

mechanické vlastnosti- získání elasticity, vzrůst mechanické a strukturní pevnosti, zvýšení modulu, vznik odolnosti proti opotřebení, snížení trvalého protažení, tažnosti a trvalé deformace

citlivost k teplotě- elasticita v širokém rozmezí teplot (surový kaučuk je za tepla měkký a lepkavý, za chladu tuhý a nepružný)

fyzikální vlastnosti- index lomu, tepelná vodivost a roztažnost

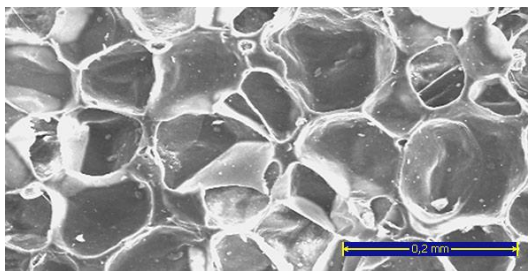
změna v botnění a rozpustnosti- nevulkanizovaný kaučuk se v různých rozpouštědlech poměrně snadno rozpouští, vulkanizát je nerozpustný, pouze omezeně botná (závisí na druhu kaučuku, stupni vulkanizace a povaze rozpouštědla)

Proces vulkanizace může probíhat v lise (lisování tlakové, raznicové, transférové), nebo v kotli (v páře nebo ve vzduchu). Další alternativou je vulkanizace volná, beztlaková.

[24, 25, 26]

1.2.2. Neopren

Neopren je obchodní název chloroprenu (syntetické, chlorbutadienové pryže). Izolační schopnosti jsou dány plynem, který je obsažen v bublinkách pěnového neoprenu. U běžného neoprenu není v bublinkách vzduch, ani dusík, ale vulkanizací vzniklá směs plynů obsahující vysoké procento vodíku (přesné složení není známo). Neopren může být i pěněný dusíkem. Na obrázku 1.14 lze vidět řez tímto materiálem. [8]



Obr. 1.14: Řez neoprenem pod elektronovým testovacím mikroskopem[8]

Vstupní surovinou pro výrobu neoprenu je především syntetický kaučuk v podobě malých, tvrdých hrudek. Vypěnění při vulkanizaci a výsledné mechanické vlastnosti matrice zajišťují další gumárenské složky. Během dokonalého třístupňového promísení se tuhá a houževnatá směs ohřívá. Aby nedošlo k předčasné vulkanizaci, musí být všechny stroje dokonale chlazeny. Mezi jednotlivými stupni promísení se nechává směs v podobě bochníků po delší dobu odležet. Poté je protlačena dvěma velkými válci. Tento proces trvá 72 hodin. Gumárenská směs míchárnu opouští v podobě vyváleného světle šedého těsta.



Obr. 1.15: Neoprenové slaby[8]

Před dalším zpracování je směs opět rozdrovena strojem připomínající mlýnek na maso. Na výstupu tohoto zařízení je směs protlačována sadou sít (od nejhrubšího po nejjemnější). Z pevné světle šedé hmoty tak vzniká viskózní černá kaše, jež se rozprostře na plech a vloží do patrového vulkanizačního lisu.

[8, 9]

Vypěnění a vulkanizace probíhá za stálé teploty a tlaku. Tento proces je velice citlivý i na klimatizační podmínky (teplotu a vlhkost vzduchu) ve výrobní hale. Podle odebíraných vzorků se technologické parametry průběžně upravují. Výsledkem jsou hrubé desky (slaby- obr. 1.15) o rozměrech cca 1300 mm x 2200 mm x 30 mm. Po 14 denním dozrávání jsou tyto pláty přesunuty na rozřezání.

Nejprve je slab zarovnán na přesnou tloušťku. Vrchní vrstva je odpadem a pláty řezané zprostřed mají v rovině řezu otevřené bubliny. Využit může být teprve poslední plát, který je zespodu hladký.

Vlastnosti neoprenu

Neopren má vynikající tepelně izolační vlastnosti, odolnost vůči atmosférickým vlivům, je odolný vůči teplotě, stárnutí a olejům. [8, 9]

1.2.3. Silikon

Silikon neboli polysiloxan, je anorganicko-organický polymer. Jedná se o makromolekulární organokřemičitou sloučeninu. Jeho základ tvoří řetězec, ve kterém se střídají atomy křemíku a kyslíku. Organické skupiny jsou navázány na atomy křemíku. Silikony jsou použity pro výrobu mnoho různých výrobků a tvoří komponenty řady dalších. [10, 12, 17]

Vlastnosti silikonů

Díky svému umělému původu jsou silikony odolní vůči živým organizmům. Další významnou vlastností je například vodoodpudivost, paropropustnost, relativní nehořlavost nebo dlouhodobá odolnost vůči UV záření a povětrnostním podmínkám. Nelepí se na mnoho podkladů, ale velmi dobře přilnou k ostatním (například sklo). Silikon může být zpracován jako izolant i jako vodič. Proto je vhodný pro širokou škálu elektrických aplikací. Silikony mají také dobré elektroizolační vlastnosti a silikony fluorované jsou i olejovzdorné. Od jiných polymerů silikony odlišují vlastnosti jako je například relativní stálosti vlastností v širokém rozmezí teplot. Jejich dlouhodobá tepelná odolnost se pohybuje v intervalu od -60 do +180°C (speciální typy -100 až +260°C, krátkodobě až +320°C). [10, 12, 17]

1.2.4. PU pěny

Polyuretan je skupina polymerů vzniklých reakcí vícefunkčních izokyanátů s polyalkoholy za přítomnosti katalyzátoru a dalších přísad. Výhodou tohoto materiálu je schopnost vrátit se do původního tvaru, odolnost vůči benzínu, alkoholu a olejům. Dále odolávají působení kyslíku a ozónu, mají malou propustnost plynů, dobrou pevnost, odolnost vůči vibracím a proti atmosférickým vlivům. Polyuretany mají dobré tepelně-izolační a zvukové vlastnosti a jsou odolné vůči chemickému stárnutí. Nevýhodou je nízká odolnost vůči kyselinám, zásadám a vroucí vodě. [18]

PU pěny jsou rozděleny podle fyzikálních a chemických vlastností polymeru. Tyto vlastnosti jsou dány stupněm zesíťování a rozvětvení polymeru a dále určují způsob využití pěny. Změnou stupně rozvětvení lze dosáhnout plastické hmoty jakéhokoliv typu. Dle materiálové směsi lze tedy pěny rozdělit do následujících skupin:

- Tvrdé- vyrábí se přidáním většího množství izokyanátu do materiálové směsi (až 70% z celkové hmotnosti), jejich vlastnosti jsou dobré. Používají se jako izolační materiál.
- Polotvrdé-
- Měkké (gumotex)
vysoko elastické pěny- díky větším pórům velmi dobrá prodyšnost, lepší tvarová stálost, dobré elastické vlastnosti, používají se na výrobu matrací, čalouněného nábytku [19]

Polyuretanová pěna může být vyrobena dvěma způsoby- procesem *jednofázovým* a *dvoufázovým*.

Látky ovlivňující reakce procesů při výrobě PU pěn:

Katalyzátory- ovlivňují celkovou rychlost reakcí a také naopak poměr rychlosti reakcí, které vedou k prodloužení lineárního řetězce. Dle toho, zda mají za úkol reakce zrychlovat, či zpomalovat se dále dělí na katalyzátory kladné a záporné.

Nadouvadla- zvyšují měkkost a objemnost pěn

[19, 27, 28]

Povrchově aktivní látky- používají se k úpravě vlastností polymeru po dobu pění a ke stabilizaci pěn. Tyto látky regulují velikost pórů a zabraňují vzniku povrchových defektů tím, že strukturu pórů také stabilizují.

Sítovadla- zlepšuje rozměrovou stabilitu pěn

Aditiva- barviva, zpomalovače hoření, odolnost vůči bakteriím, změkčovadla, antistatické přípravky a kompatibilizátory

Saze uhlíku- zvyšují vodivost pěny, přidávají se do materiálové složky PU pěny

[19, 27, 28]

Vlastnosti PU pěn

Mezi jednotlivé vlastnosti PU pěn patří hustota, elasticita, prodyšnost a tuhost.

Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je charakterizována jako míra hmotnosti na jednotku objemu. Ovlivňuje životnost PU pěn. Je-li při výrobě použit polymer s vyšší hustotou, je při dynamickém namáhání dosažena nižší trvalá deformace pěny. Pěny s vyšší hustotou se používají u často namáhaných částí výrobků (matrace, sedačky atd.).

Hystereze je ztráta energie stanovená jako rozdíl energií při stlačení a opětovném uvolnění. PU pěna reaguje na pohyb a tlak změnou svého tvaru. Čím je elasticita vyšší, tím je rozložení tlaku rovnoměrnější.

Prodyšnost je dána množstvím a velikostí pórů ve struktuře PU pěn. Čím jsou buňky otevřenější, tím je materiál prodyšnější. Tato vlastnost je důležitá z hlediska hygieny, jelikož vyrovnává teplotní rozdíly a odevzdává tělesnou vlhkost.

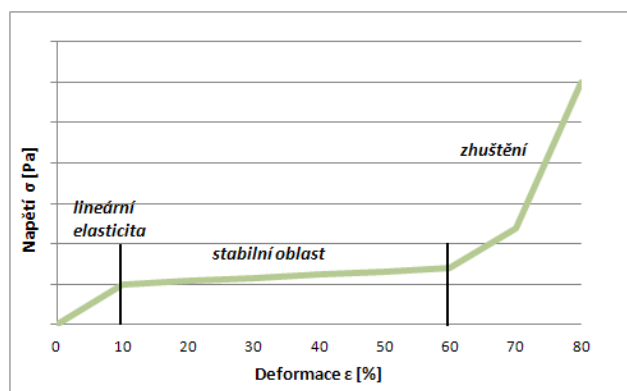
Tuhost je charakterizována jako deformace způsobená stlačením pěny. Závisí na struktuře a chemickém složení.

[29, 30]

Mechanické vlastnosti PU pěn

Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny morfologií pěn, strukturou, hustotou, deformační rychlostí a účelem, pro který byly vyrobeny. Křivka tlakového zatížení PU pěny (obr. 1.16) má 3 oblasti: lineárně elastická oblast, stabilní oblast, oblast s prudkým nárůstem napětí.

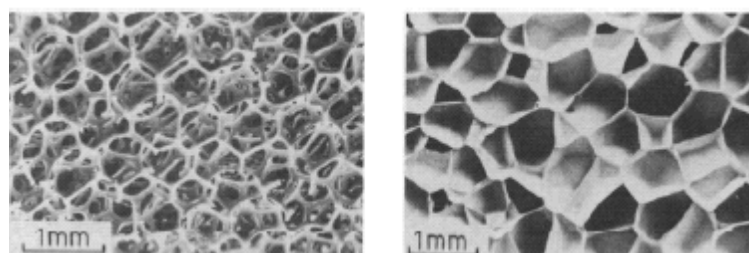
[31]



Obr. 1.16: Křivka napětí a deformace elastické pěny [31]

Lineárně elastická oblast nastává při zatěžování menším než 5% a lze popsat Hookovým zákonem. Stabilní oblast je dána velkým nárůstem deformace při malém zvýšení napětí. V případě neelastické pěny vzniká nevratná deformace buněk. Prudký nárůst napětí vzniká zvýšením hustoty pěn tím, že se stěny buněk začnou dotýkat. Materiál se pak chová jako materiál plný.

Struktura pěn (obr. 17) může být otevřená či uzavřená, přičemž struktura uzavřená má lepší tepelně-izolační vlastnosti.



a) Otevřená

b) uzavřená

Obr. 1.17: Struktura PU pěny [50]

Křehké pěny se chovají jinak, než pěny elastické či plastické. V nejslabším místě buněk dochází k poškození struktury buněk. Například, **polymerní pěny jsou v tahu křehké a v tlaku plastické.** [31]

2. Výběr materiálu vhodného pro použití v experimentální části

Předešlá kapitola podává přehled běžně dostupných elastických materiálů, z nichž byla vybrána PU pěna jako detektor velkých deformací. Hlavním důvodem je schopnost materiálu odolávat trvalým deformacím, prodyšnost a snadná dostupnost. Ostatní výše popsané materiály jsou pro toto uplatnění příliš tuhé (např. pěna EPDM či neopren). Aby bylo možné PU pěnu uplatnit v praxi pro tento účel, je nutné, aby měl materiál zvýšenou elektrickou vodivost.

Úpravy zvyšující vodivost nevodivých materiálů

Výše popsané elastické materiály patří mezi izolanty. Elektrická vodivost může být u materiálů zvyšována několika způsoby. Jako první lze uvést například rozptýlení velkého množství uhlíkových částic (sazí) přímo do materiálové směsi, kdy je zajištěno dostatečně rovnoměrné uspořádání uhlíkových částic v PU matrici a tedy i jednotvárné elektrické vlastnosti pěny. V případě povrchové úpravy (vodivé disperze) lze říci, že se jedná o úpravu nestálou během mechanického namáhání. Pro experiment této práce je tedy druhý způsob zvýšení vodivosti nevodivého materiálu nevhodný.

Vodivá PU pěna proto byla vybrána s přídavkem uhlíkových sazí a byla použita v experimentální části jako zkušební vzorek.

3. Elektrická veličina vhodná pro popis deformace zvoleného materiálu

Testovaný vzorek bude v experimentální části podléhat řadě zkoušek zjišťujících vliv klimatických podmínek a mechanického namáhání na elektrickou vodivost materiálu. Převrácenou hodnotou elektrické vodivosti je elektrický odpor. Tato veličina je z hlediska dostupnosti měřících zařízení snadno měřitelná, což je výhodou nejen z hlediska časového, ale také finančního.

3.1. Elektrický odpor

Značka veličiny: **R**

Jednotka SI: **ohm** [Ω]

Elektrický odpor je fyzikální veličina charakterizující schopnost elektricky vodivých materiálů vést elektrický proud.

Hodnota elektrického odporu je vždy kladná a je dána materiálem, tvarem a teplotou vodiče. Dobré vodiče mají odpor malý, naproti tomu špatné vodiče se vyznačují velkým elektrickým odporem. Jeho obrácená hodnota je další fyzikální veličina zvaná *elektrická vodivost* (schopnost dobře vést elektrický proud).

Měření elektrického odporu

Tato veličina je měřena digitálním nebo analogovým měřicím přístrojem, nebo metodou Ohmovou, substituční nebo porovnávací. K napájení obvodu s odporem musí být použit vždy stejnosměrný proud (střídavé napájení zjistí hodnotu impedance celého obvodu, tedy vlastnost potřebnou pro analýzu střídavých elektrických obvodů). [14, 15, 16]

4. Experimentální část

4.1. Návrh a cíl experimentu

Navržené čidlo pro snímání kontaktního tlaku, kterým tělo pacienta působí na podložku (matraci) má být levnější a tedy pro pacienta dostupnější alternativou zdravotnického doplňku při prevenci proleženin.

Předpoklad uspořádání čidla bránícího vzniku proleženin

Kompletní čidlo bude vkládáno pod matraci. Předpokládá se, že snímač bude tvořen vrstvou hyperplastického materiálu a deskou se snímacími elektrodami. Jelikož matrace v nemocnicích nejsou položeny na rošttech, ale na plastové desce, není důvod brát v potaz prodyšnost desky nebo čidla.

Zařízení bude opatřeno čidlem vlhkosti a teploty. Kompenzace vlhkosti a teploty budou popsány vhodnou funkcí závislostí. Navržené snímací elektrody budou propojeny do společné řídicí jednotky, která ovládá polohovací postel. V případě dosažení kritické hodnoty kontaktního tlaku bude obsluha pacienta upozorněna, že k tomuto stavu došlo a že je tedy zapotřebí změnit polohu ležícího.

Materiálový charakter a rozměry snímacích elektrod

Materiál, který bude na snímací elektrody použit, by neměl podléhat stárnutí a vnějším vlivům, a musí splňovat podmínku elektrické vodivosti. Jejich rozměr je závislý na uspořádání tlakového pole a na rozložení tlaku vlivem působení na jeden bod, stejně jako vzdálenost mezi jednotlivými elektrodami. Tyto parametry nelze určit teoreticky a jsou předmětem mnoha na sebe navazujících a vzájemně se ovlivňujících experimentů. To je ovšem záležitost hlubšího výzkumu než může diplomová práce obsahovat.

Uspořádání snímacích elektrod

Uspořádání snímacích elektrod lze provést jednoduše v řadách, nebo v „obrazcích“. V tomto případě je druhá varianta zbytečně složitá a s mnoha rušivými faktory ovlivňující správné získání hodnoty kontaktního tlaku. Jedná se zejména o špatnou identifikaci místa vzniku tlaku. Také je zde riziko vzájemného ovlivňování snímacích elektrod. Otázkou však je, zda tento „problém“ nemůže být naopak výhodou. Opět je to záležitostí mnoha experimentů.

Cílem tohoto experimentu je získat informace o tom, jak se použitý vzorek pěny chová při různých podmínkách, např. při různých režimech namáhání, během změny teploty a relativní vlhkosti. Jako zkušební vzorek jsou použity dva druhy vodivé PU pěny, které se liší tloušťkou. Dalším úkolem je navrhnout a ověřit vhodný způsob snímání elektrického odporu z PU pěny. K tomuto testu byla vyrobena testovací deska v podobě tištěného spoje se snímacími elektrodami různých rozměrů a materiálového charakteru (povrchové úpravy). Veličinou, charakterizující vodivou PU pěnu, je v tomto případě elektrický odpor, respektive vodivost. Každé měření probíhalo celkem 5 -krát a bylo statisticky zpracováno, tj. doplněno o průměr a interval spolehlivosti. Průměrné hodnoty pro každý experiment jsou graficky zpracovány včetně chybových úseček. Tabulkový přehled naměřených konkrétních hodnot je uveden v příloze.

4.2. Použitá měřící zařízení a pomůcky

Tato kapitola obsahuje přehled měřících zařízení, která byla v experimentální části použita.

Měřící zařízení

Zařízení pro stanovení elektrického odporu

Hodnota elektrického odporu byla získána vždy pomocí multimetru značky Fluke 187 (obr. 4.1). Přístroj dále slouží k měření teploty, frekvence, konduktance, kapacitance, elektrického napětí a proudu. Parametry přístroje týkající se měření elektrického odporu jsou uvedeny v tabulce 1.

Přesnost měření [%]	Maximální rozlišení [Ω]	Maximum [$M\Omega$]
$\pm 0,05$	0,01	500

Tab. 1: Parametry přístroje pro měření elektrického odporu

[23]



Obr 4.1: Přístroj pro získávání hodnoty elektrického odporu [20]

Trhací stroj Labtest 2.050

Stroj je určen pro statické mechanické zkoušky v tlaku, tahu, ohybu, krutu a cyklickém namáhání vzorků i celých výrobků. Zařízení je umístěno v laboratoři KNT. Trhací stroj Labtest je zobrazen na obrázku 4.2 a jeho parametry jsou uvedeny v tab. 2.

Rozsah zatěžovací síly [kN]	Maximální upínací šíře [mm]
0 - 5	100
Rychlost zatěžování [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	Maximální rozměr vzorku [mm]
0 - 600	200 x 200

Tab. 2: Parametry trhacího stroje Labtest 2.050



Obr. 4.2: Trhací stroj Labtest 2.050

Teplovzdušná komora

Závislost odporu PU pěny na teplotě, byla zjištěna pomocí teplovzdušné komory typu MEMMERT model 400 (obr. 4.3) s maximální teplotou vzduchu 300°C, umístěné v laboratoři KNT.



Obr. 4.3: Teplovzdušná komora [61]

Klimatizační zkušební skříně

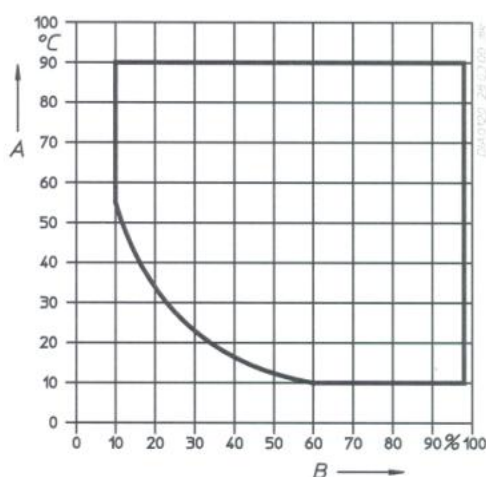
Jako zkušební zařízení pro zjištění vlivu teploty a relativní vlhkosti na hodnotu elektrického odporu, byla použita klimatizační zkušební skříně typu VÖTSCH VC 0018 Industrietechnik (obr. 4.4). Tento přístroj je umístěn v laboratoři KHT. Jeho teplotní a vlhkostní rozsah je uveden v tabulce 3. Na obrázku 4.5 je zobrazen graf použitelného rozsahu vlhkosti měřicího zařízení.

Teplotní rozsah [°C]	Rozsah vlhkosti [%]
10 ~ 90	10 ~ 98

Tab. 3: Parametry klimatizační komory



Obr. 4.4: Klimatizační zkušební skříně [35]



A – teplota zkušebního prostoru [°C]

B – relativní vlhkost vzduchu [%]

Obr. 4.5: Diagram vlhkosti klimatizační zkušební skříně

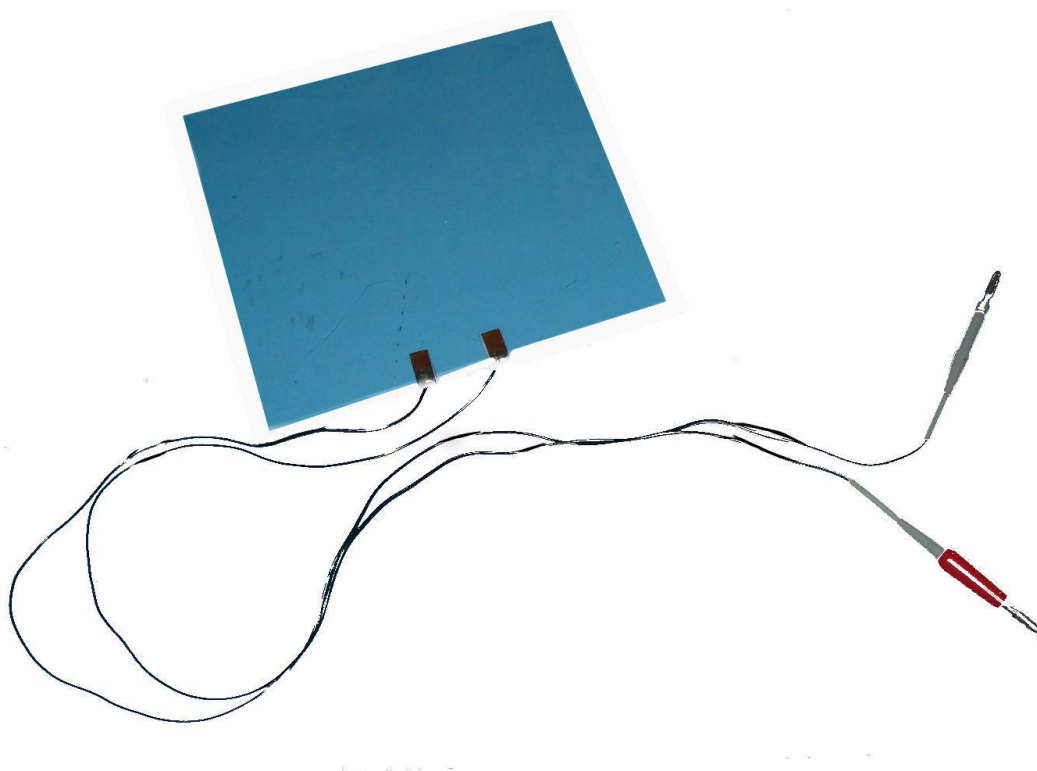
Zkušební pomůcky

Elektricky nevodivá podložka

Jelikož je zkušební vzorek elektricky vodivý, byla pro experimenty použita nevodivá skleněná deska - aby bylo možné experimentálně získat nezkreslené hodnoty elektrického odporu. Na okraji této desky byly připevněny dva snímače elektrického odporu, které od sebe byly vzdáleny 25 mm. Nejprve byly elektrody vyrobeny z hliníkové folie. Tento materiál však nevykazoval stabilní měření. Z toho důvodu byl hliník nahrazen plátkou mědi. Izolační deska s měděnými snímacími elektrodami je zobrazena na obrázku 4.6. Další vlastnosti nevodivé podložky jsou uvedeny v tabulce 4.

Rozměry skleněné desky [mm]	Rozměr snímacích elektrod [mm]
200 x 200	15 x 8 x 1

Tab. 4: Parametry nevodivé podložky



Obr. 4.6: Skleněná deska s připevněným snímači elektrického odporu

Testovací deska

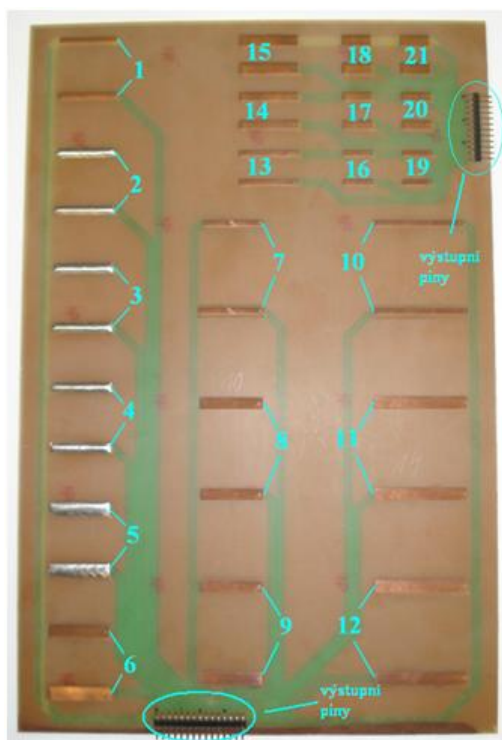
Na desce je navrženo několik provedení snímacích elektrod, které se liší velikostí a rozstupem. Tyto elektrody jsou vyrobeny z **mědi** a některé z nich jsou opatřeny vrstvou **cínu**. Jsou umístěny párově ve dvou obvodech. Testovací deska má podobu tištěného spoje. Na základě získaných výsledků lze určit, které uspořádání je pro reálné snímače nejvhodnější.

Testovací deska je zobrazena na obr. 4.7. Elektrody tvořící páry jsou popsány přidělenými čísly. Rozměry jednotlivých navržených snímacích elektrod jsou uvedeny v tab. 5. Pro větší přehlednost byly barevně odlišeny rozdílné vzdálenosti mezi jednotlivými čidly.

Výstupní piny- slouží k připojení snímače elektrického odporu (multimetr Fluke 187). Elektrody ze snímacího páru v rámci jedné řady obvodu mají společný výstupní pin. Každé další elektrodě pak náleží jeden výstupní pin.

Velký obvod- obsahuje snímací elektrody 1 – 12.

Malý obvod- obsahuje snímací elektrody 13 – 21.



Obr. 4.7: Testovací deska

Elektroda	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Délka [mm]	25									38		
Šířka [mm]	3		4		5		3	4	5	3	4	5
Vzdálenost [mm]	25						37,5					
Materiál	Cu		Sn			Cu						

Elektroda	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Délka[mm]	25			12			13		
Šířka [mm]	3	4	5	3	4	5	3	4	5
Vzdálenost [mm]	13								
Materiál	Cu								

Tab. 5: Parametry jednotlivých navržených elektrod pro snímání tlaku

Zatěžovací těleso

Pro experimenty, které byly v diplomové práci provedeny, byla použita dvě různá, plochá zatěžovací tělesa (obr. 4.8).

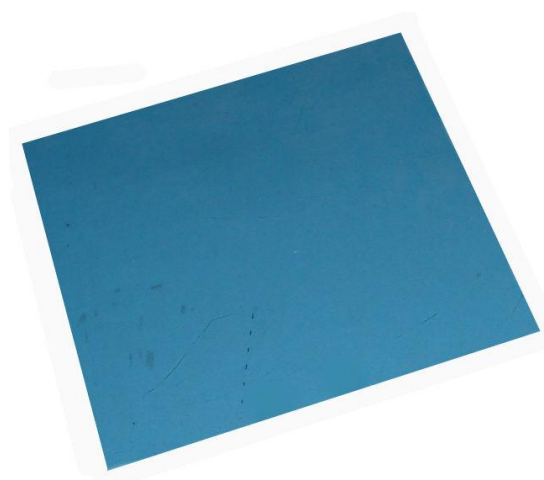
Skleněná deska – pro experimenty, během nichž dochází ke změnám klimatických podmínek

Kovová deska – pro experimenty za běžných klimatických podmínek, vždy v kombinaci s paropropustnou membránou

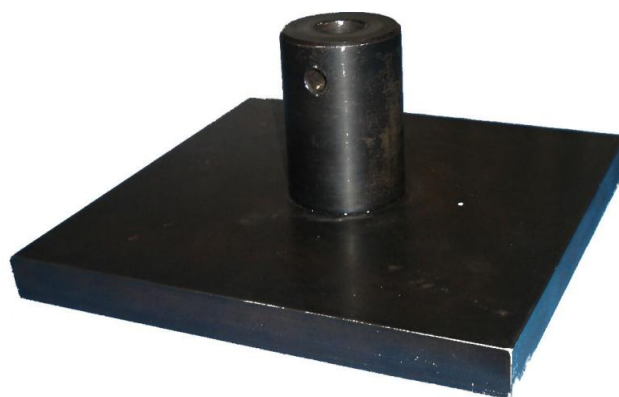
Další vlastnosti zatěžovacích těles jsou uvedeny v tabulce 6.

Rozměry skleněné zatěžovací desky [mm]	Rozměry kovové zatěžovací desky [mm]
200 x 200	200 x 200
Hmotnost skleněné zatěžovací desky [kg]	Hmotnost kovové zatěžovací desky [kg]
0,6	7,4

Tab. 6: Parametry zatěžovacích těles



a) zatěžovací skleněné těleso



b) zatěžovací kovové těleso

Obr. 4.8: Zatěžovací těleso

Paropropustná membrána

V případě použití kovové zatěžovací desky, byl mezi vzorek PU pěny a zátěž vložen vzorek paropropustné membrány. Důvodem je elektrická vodivost zatěžovacího tělesa, která by zkreslovala výsledky experimentu. Tato membrána je běžně používána jako potahový materiál nemocničních matrací. Jedná se o pleteninu opatřenou mikroporézním polyuretanovým zátěrem, tvořící lícni stranu potahu. Textilie propouští vzduch, ale nepropouští vodu. Vlastnosti vzorku jsou uvedeny v tab. 7.

Rozměry vzorku [mm]	Tloušťka vzorku [mm]
250 x 250	$0,799 \pm 0,03$
Plošná hmotnost [g.m^{-2}]	Objemová hmotnost [kg.m^{-3}]
$252,6 \pm 1,44$	$316,15 \pm 15,1$

Tab. 7: Parametry vzorku potahové textilie

4.3. Testovací deska pro výběr vhodné snímací elektrody

Aby bylo možné experimentálně vybrat vhodné čidlo pro snímání kontaktního tlaku, bylo nutné vyrobit testovací desku v podobě tištěného spoje. Na desce jsou párově umístěny *měděné* a *cínové* elektrody. Ty se od sebe liší rozměry a vzdálenostmi mezi jednotlivými páry.

Tištěný spoj

Používá se pro mechanické připevnění a zároveň pro elektrické propojení elektronických součástek. Základním materiálem pro výrobu tištěného spoje je laminát ze skelné tkaniny sycený epoxidovou pryskyřicí. Z jedné strany je nalepena měděná fólie. K elektrickému propojení mezi jednotlivými součástkami dochází přes měděné vodiče. Ty jsou vyrobeny leptáním měděné fólie nanesené na izolační laminátové panely různé tloušťky, různých rozměrů a s různou tloušťkou povrchové úpravy. Samotné součástky jsou za své vývody, ve formě drátů, připájeny cínovou pájkou. Tyto vývody ve formě drátků, se vloží do příslušného otvoru v desce tištěného spoje a z druhé strany se připájí k bodům vytvořeným vrstvou mědi.

Povrch desky je chráněn nepájivou maskou „typické“ zelené barvy. Nepájivá maska představuje poloprůhlednou izolační vrstvu, která zabraňuje poškození vodivých cest, zlepšuje izolační vlastnosti a usnadňuje proces osazení a pájení. Pokrývá celou desku spoje a ponechá odkrytá místa určená pro pájení. Na tato místa je nanесena povrchová úprava cínu a mědi. [32, 33]

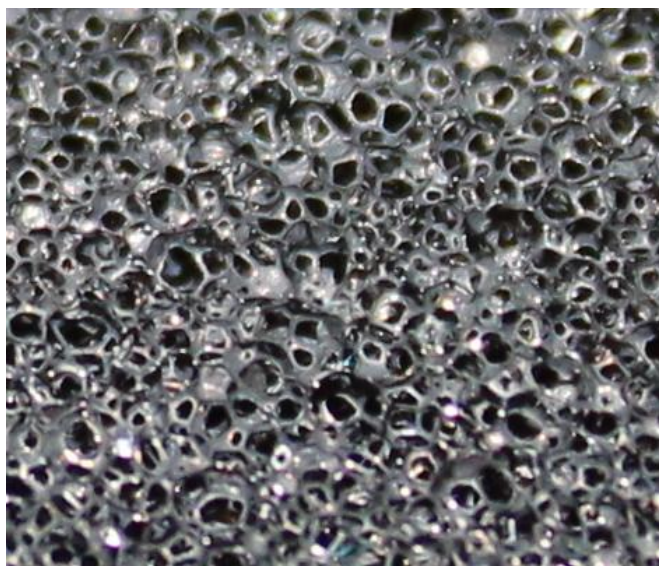
4.4. Popis testovaného vzorku

Pro experimentální část byla vybrána komerčně vyráběná měkká flexibilní polyuretanová pěna. Zvýšení vodivosti pěny je dosahováno přidavkem uhlíkových částic do jedné ze složek polyuretanu. Tím je zajištěno dostatečně rovnoměrné uspořádání uhlíkových částic v PU matrici a tedy i elektrická vlastnost pěny. Vzorek poskytla firma SM electronic Liberec. Výrobce pěny je společnost Wolfgang Warmbie. Své využití má tento výrobek při balení elektronických součástek, a tištěných spojů.

Elektricky vodivá pěna tlumí nárazy, zvyšuje ochranu obalu před světlem, ale především výrobek chrání před elektrostatickým výbojem. Rozměry vzorků jsou dány požadavkem většiny odběratelů. Na obrázku 4.9 je zobrazena buněčná struktura PU pěny. Další vlastnosti vzorku jsou uvedeny v tabulce 8. [11]

Rozměry vzorku pěna 6 [mm]	Rozměry vzorku pěna 15 [mm]
353 x 253 x 6	353 x 253 x 15
Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]
105,980	256, 637
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]
17,691	16,956

Tab. 8: Parametry použitých polyuretanových pěn



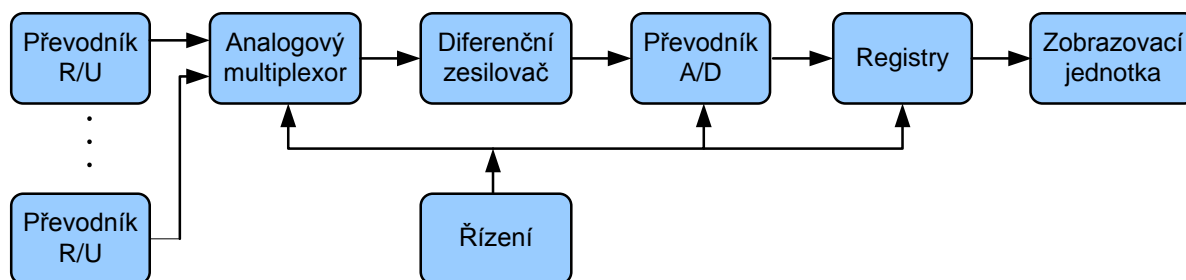
Obr. 4.9: Struktura elektricky vodivé PU pěna

4.5. Návrh měřicího zařízení a postup vyhodnocování tlakového pole

Důležitý problém představuje vlastní měření odporového, resp. tlakového pole na povrchu PU. Významnou otázkou je návrh vhodného systému elektrod (zejména jeho fyzické umístění a topologické uspořádání), který pole snímá. Zatím proběhla měření se systémem měděných drátků vsíťých do pružného potahu Dartex (paropropustná membrána) a položených na polyuretanové pěně. Toto řešení však není příliš ideální z důvodu nedefinovaného kontaktu mezi PU a potahem, a to zejména při bodovém zatížení (při plošných deformacích je elektrické pole vcelku reprodukovatelné).

Pro vlastní měření elektrického odporového pole bylo navrženo experimentální měřicí zařízení v podobě tištěného spoje, jehož blokové schéma je zobrazeno na obr. 4.10. Elektrický odpor každé sondy je převeden na elektrické napětí, které je postupně převáděno 8bitovým A/D převodníkem na číslicový signál. Naměřená data jsou ukládána do paměti a zobrazována na 7segmentovém displeji.

K vlastnímu zpracování číslicového signálu bylo použito rychlé programovatelné hradlové pole, které nezpomaluje vyhodnocování měřených dat.



Obr. 4.10: Blokové schéma elektrického zpracování odporového pole

Dynamické parametry měření jednotlivých bodů (sond) jsou omezeny rychlostí použitého A/D převodníku (aktuálně na 200 kHz pro AD7819) a analogového multiplexoru (jeho rychlost přepínání se může pohybovat v jednotkách MHz). Všechny použité bloky jsou řešeny jako nízkonapěťové (napájení 3,3 V).

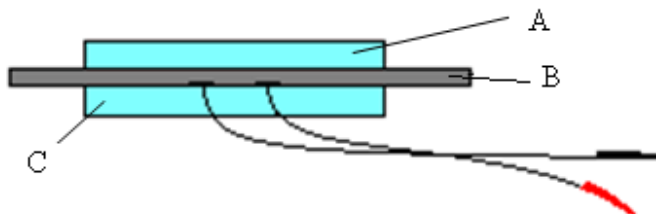
4.6. Přehled uspořádání experimentů

Vzorek byl uspořádán třemi různými způsoby dle charakteru zkoušky.

4.6.1. Stanovení vlivu změny klimatických podmínek na hodnotu

el. odporu PU pěny

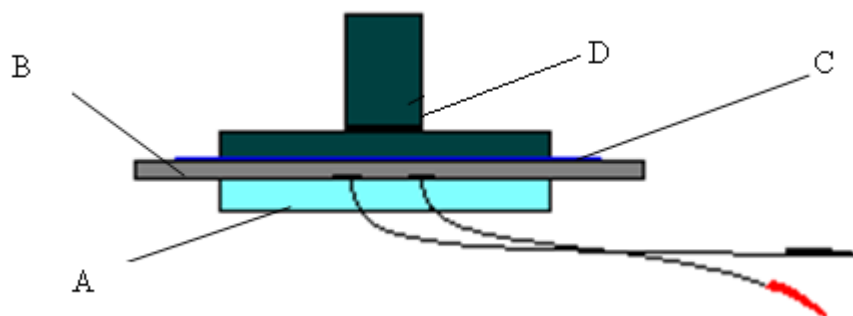
Takto byl vzorek sestaven v případě zjišťování vlivu podmínek, jako je různá teplota a relativní vlhkost, na elektrický odpor. Schéma je graficky znázorněno na obrázku 4.11.



Obr. 4.11: Grafické znázornění uspořádání zkušebního vzorku: A- skleněné zatěžovací těleso, B- PU pěna, C- elektricky nevodivá podložka

4.6.2. Stanovení relaxace napětí

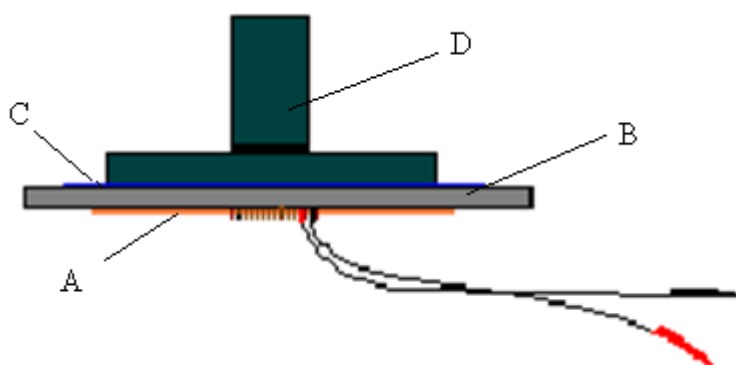
Tato varianta sestavení vzorku byla použita u zkoušek, kdy byla PU pěna mechanicky namáhána. Vložení paropropustné membrány zabraňuje ovlivnění měření vodivou plochou zatěžovacího tělesa. Toto uspořádání je zobrazeno na obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Grafické znázornění uspořádání zkušebního vzorku: A- elektricky nevodivá podložka, B- PU pěna, C- paropropustná membrána, D- kovové zatěžovací těleso

4.6.3. Výběr vhodné snímací elektrody

V tomto případě byla elektricky nevodivá podložka s měděnými elektrodami nahrazena testovací deskou. I zde platí vložení paropropustné membrány mezi PU pěnu a kovové zatěžovací těleso. Uspořádání (viz obr. 4.13) bylo určeno k návrhu vhodného způsobu snímání elektrického odporu z PU pěny.



Obr. 4.13: Grafické znázornění uspořádání zkušebního vzorku: A- testovací deska, B- PU pěna, C- paropropustná membrána, D- kovové zatěžovací těleso

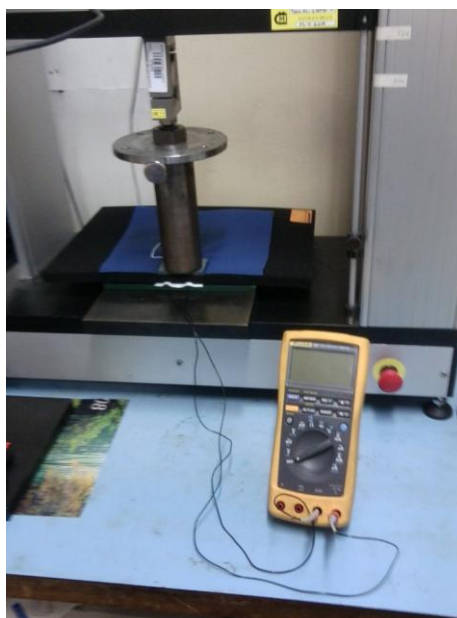
5. Výsledky experimentu

5.1. Závislost elektrického odporu na deformaci PU pěny

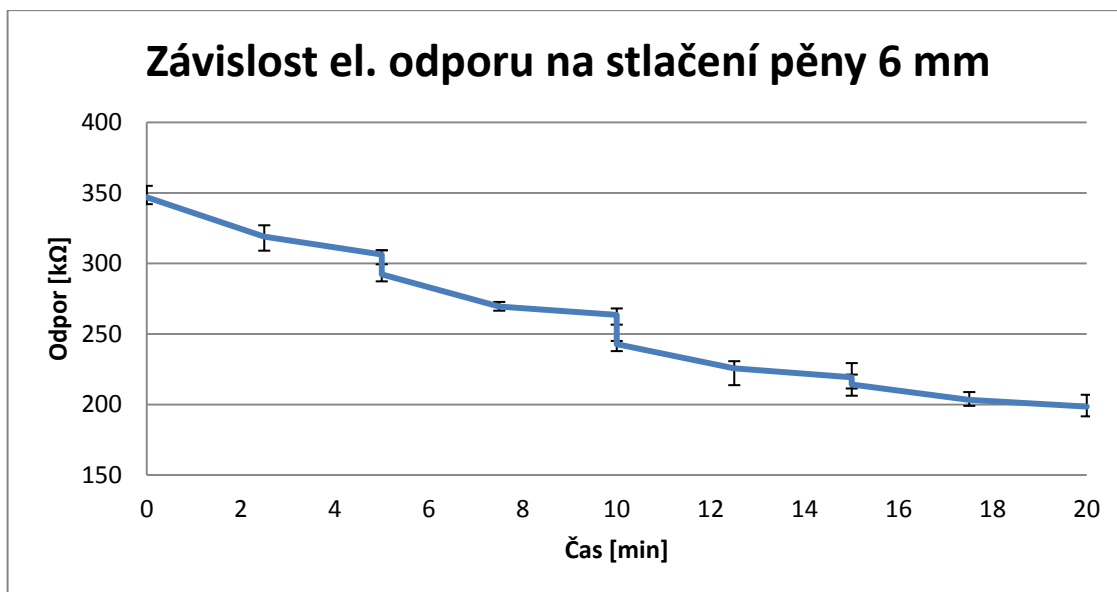
Elektrický odpor pěny v závislosti na stlačení byl měřen na zařízení Labtest 2.050 (viz. kap. 4.2), které sloužilo k definovanému stlačování PU pěny pomocí sondy o průměru 50 mm. Mezi sondu a PU pěnu byla vložena paropropustná membrána s PU zátěrem. Grafické uspořádání vzorku je uvedeno v kapitole 4.6.2. Rozdílem je v tomto případě tvar kovové zátěže.

Postup měření

Vzorek s paropropustnou membránou umístěný na skleněné podložce, byl vložen pod přítlakovou část trhačího stroje (obr. 5.1). Zatížení proběhlo v pěti krocích, přičemž při následujícím kroku byla zvýšena hodnota deformace o 20 %. Hodnota deformace byla udržována po dobu 5 minut, přičemž průměrná hodnota odporu byla snímána po dobu 30 vteřin a to: ihned po zatížení, po 120 s a po 270 s. Poté se deformace o 20 % zvýšila. Měření bylo provedeno 5-krát. Statisticky zpracované výsledky jsou vyneseny v grafech 1a 2.

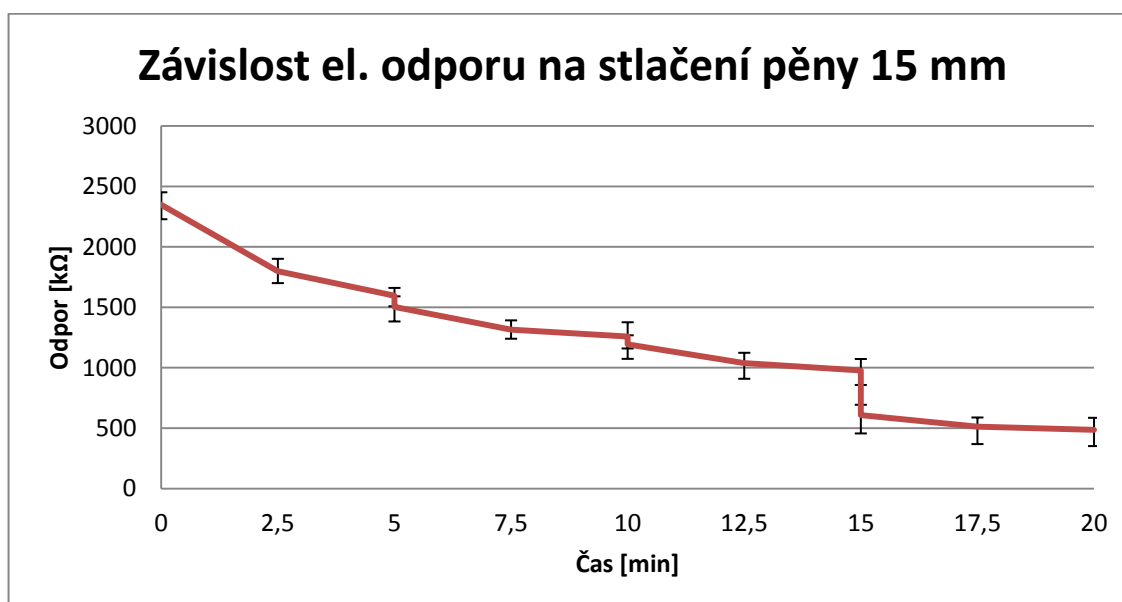


Obr. 5.1: Uspořádání experimentu stanovení elektrického odporu v závislosti na stlačení



Graf 1: Závislost hodnoty elektrického odporu PU pěny 6 mm na deformaci a době zatížení

Z výsledků lze konstatovat, že odpor se stlačením klesá nelineárně, ale monotónně, a při konstantní hodnotě deformace se jeho hodnota významně nemění. K největšímu poklesu došlo při působení 20% a 40% deformace. Z grafu je zřejmé, že v čase 10 minut, kdy proběhlo zaznamenání hodnoty elektrického odporu PU pěny v poslední fázi dané deformace a zároveň v první fázi následující deformace, byly zjištěny největší rozdíly měřené veličiny.



Graf 2: Závislost hodnoty elektrického odporu PU pěny 15 mm na deformaci a době zatížení

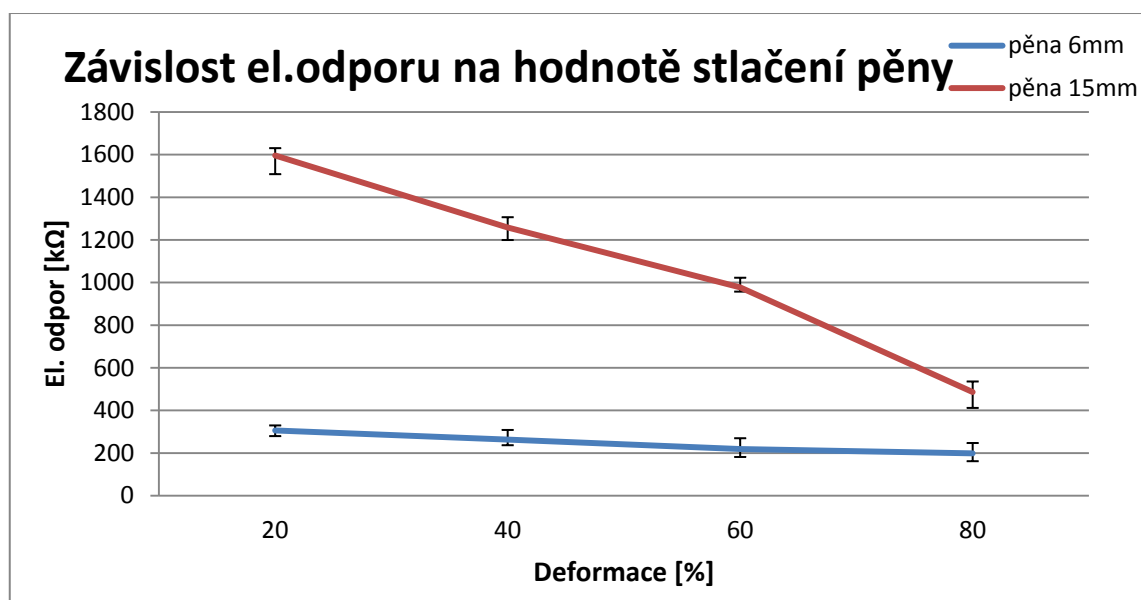
Tabulka 9 udává procentuální pokles hodnoty elektrického odporu pěn během měření.

Procentuální vyjádření hodnot elektrického odporu PU pěn získaných měření	
Pěna 6 mm	Pěna 15 mm
-42,78%	-79,28%

Tab. 9: Procentuální vyjádření rozdílu elektrického odporu v závislosti na stlačení

Dle výše uvedených grafů a tabulky obsahující procentuální vyjádření rozdílu elektrického odporu pěn získaného zvyšováním deformace, je patrné že větší pokles měřené veličiny vykazovala PU pěna 15 mm, která také dosahovala širšího rozptylu hodnot elektrického odporu. Počáteční hodnota byla naměřena 2348,5 k Ω , konečná 486,49 k Ω . Značný rozdíl hodnot je znát v průběhu 20% konstantní deformace a v čase 15ti minut, kdy dochází ke změně nastavení stlačení z hodnoty 60% na 80%.

Graf číslo 3 porovnává hodnoty elektrického odporu pěn, které byly získané v posledním časovém úseku jednotlivého stupně deformace.



Graf 3: Porovnání hodnot elektrického odporu PU pěn 6 mm a 15 mm závislého na deformaci

Shrnutí

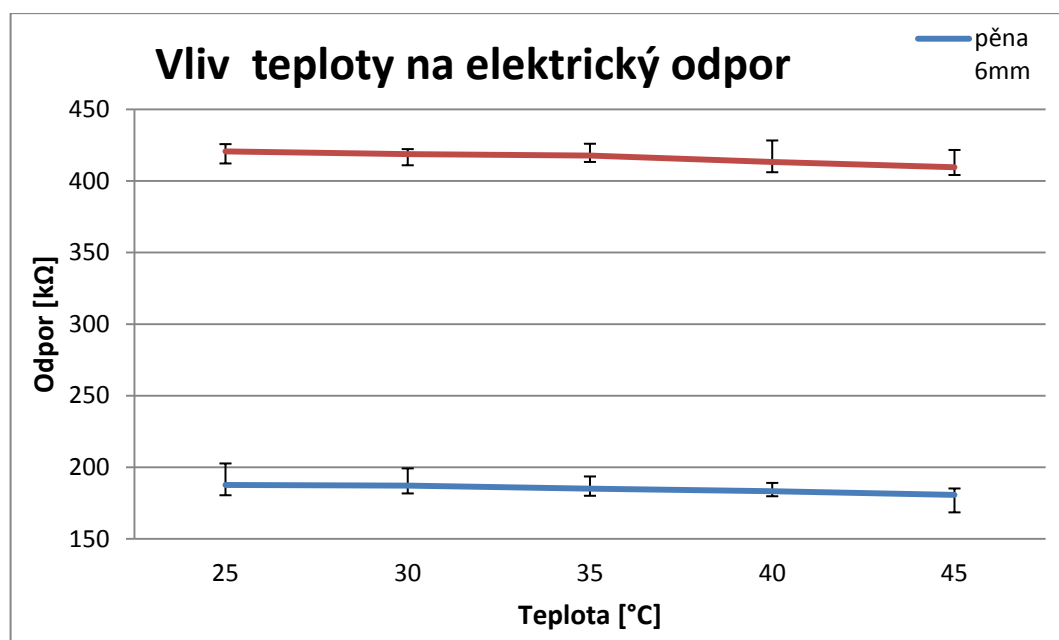
Se zvyšující deformací hodnota elektrického odporu klesá. Důvodem je charakter PU pěny. Čím blíže jsou vodivé částice uhlíku u sebe, tím větší elektrický odpor materiál vykazuje. V grafu 3 jsou vyneseny poslední hodnoty při působení konstantní deformace. Větší rozsah průměrných hodnot elektrického odporu byly zaznamenány během měření PU pěny 15 mm. Tento vzorek vykazoval elektrický odpor velikosti 2348,5 k Ω – 486,49 k Ω . Elektrický odpor pěny 6 mm se pohyboval značně níže, v rozmezí od 347,01 k Ω do 198,56 k Ω .

5.2. Závislost odporu PU pěny na teplotě okolí

Cílem této zkoušky bylo zjistit vliv teploty okolí na hodnotu elektrického odporu pěny. Vzorek elektricky vodivé pěny s elektrodami byl umístěn do teplovzdušné komory (viz. kap. 4.2). Uspořádání vzorku je znázorněno v kapitole 4.6.3. Měření probíhalo v rozsahu teplot od 25°C ~ 45°C.

Postup měření

Po dosažení požadované teploty byla tato udržována po dobu dalších 10 minut, aby došlo k prohřátí pěny v celém objemu a poté byla změřena průměrná hodnota elektrického odporu. Aplikovány byly teploty 25, 30, 35, 40 a 45°C. Jedná se o klimatické podmínky, ve kterých se bude PU pěna reálně nacházet. Průměrné hodnoty měření jsou vyneseny v grafu číslo 4.



Graf 4: Srovnání hodnot elektrického odporu PU pěn závislého na změně teploty okolí

Z grafu je patrné, že s rostoucí teplotou okolí, ve kterém se polyuretanová pěna nachází, dochází k poklesu hodnoty elektrického odporu. Průběh klesání je u obou pěn pozvolný. Hodnoty el. proudu pěny 15 mm jsou řádově vyšší než pěny 6 mm. Přehled poklesu elektrického odporu vyjádřený v procentech je uveden v tabulce 10.

Procentuální vyjádření hodnot elektrického odporu PU pěn získaných měření	
Pěna 6 mm	Pěna 15 mm
-3,71%	-2,63%

Tab. 10: Procentuální vyjádření rozdílu elektrického odporu v závislosti na změně teploty okolí

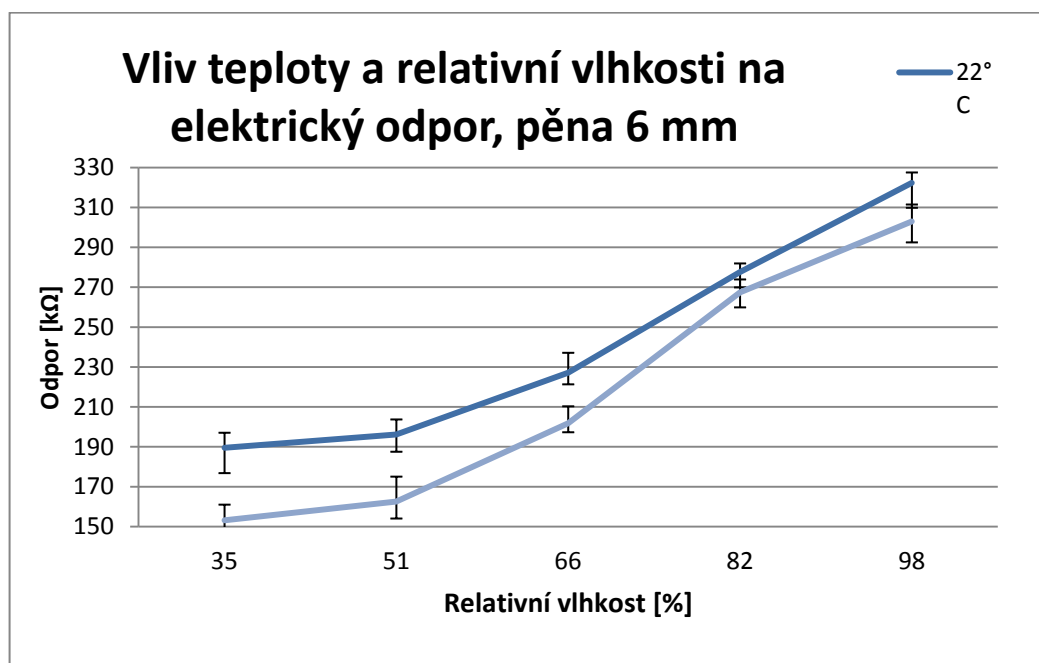
5.3. Závislost odporu PU pěny na teplotě a relativní vlhkosti

Vzhledem k povaze měřené veličiny luze očekávat, že na výsledky bude mít vliv především relativní vlhkost vzduchu v okolí pěny a pěny samotné. Z toho důvodu byl proveden test v klimatizační zkušební skříni VÖTSCH VC 0018 Industrietechnik (viz. kap. 4.2), za působení dvou různých teplot (22°C a 37°C) a relativní vlhkosti v rozsahu 35 ~ 98 %. Vzorek vložen mezi dvě skleněné desky (viz. 4.6.3).

Postup měření

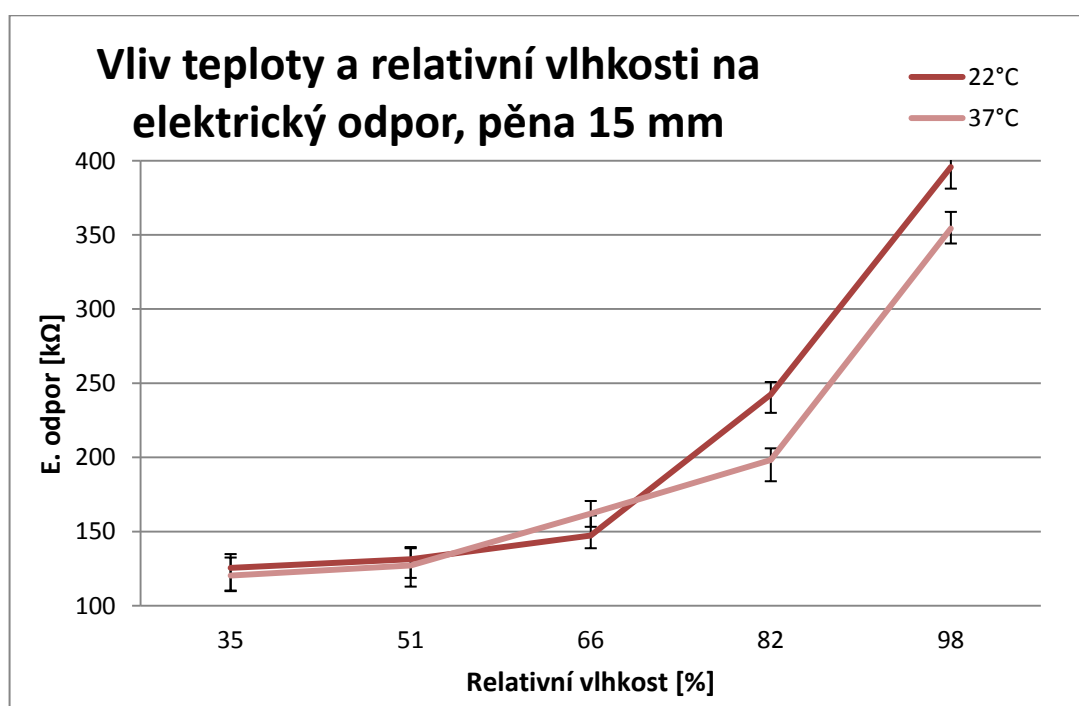
Po ustálení nastavené teploty a relativní vlhkosti byl vzorek vystaven působení po dobu 30 minut a poté byla zaznamenána průměrná hodnota elektrického odporu. Uvedená doba měla za úkol dodat zkoušenému materiálu (pěně) požadované vlastnosti.

Teplota 22°C charakterizuje přibližnou teplotu místnosti, neboli stav kdy je pěna nezahřátá. Teplota 37°C simuluje pěnu zahřátou od lidského organismu. Na vzorek působila relativní vlhkost pěti hodnot v rozsahu od 35 ~ 98 %, a to 35, 51, 66, 82, 98%. Tyto hodnoty byly stanoveny rovnoměrným rozložením daného rozsahu. Hodnota 98% relativní vlhkosti je maximální nastavitelný dosah, který zkušební zařízení umožňuje. Průměrné hodnoty elektrického odporu jsou vyneseny do bodového grafu 5 a 6.



Graf 5: Porovnání hodnot elektrického odporu PU pěny 6 mm závislého na teplotě a relativní vlhkosti okolí

V grafu 5 jsou porovnány průměrné hodnoty elektrického odporu PU pěny 6 mm ovlivněné teplotou 22°C a 37°C a relativní vlhkostí okolí v rozmezí 35 až 98%. Na první pohled je zřejmé, že se zvyšující se relativní vlhkostí elektrický odpor roste. Vyšších hodnot bylo dosaženo při působení teploty 22°C. Při nastavení teploty 37°C docházelo k prudšímu růstu el. odporu než při teplotě nižší. V obou případech platí pozvolné navýšení měřené veličiny během první změny relativní vlhkosti. Při dalších hodnotách nastavení je pak nárůst zvyšován výrazněji. Největší zaznamenaný rozdíl el. odporu PU pěny ovlivněný teplotou je na samotném začátku měření, tj. při relativní vlhkosti 35%, ten činí téměř 50 kΩ. V grafu lze vyčíst, že nejpodobnějších hodnot el. odporu bylo dosaženo při relativní vlhkosti 82%.



Graf 6: Porovnání hodnot elektrického odporu PU pěny 15 mm závislého na teplotě a relativní vlhkosti okolí

U vzorku PU pěny 15 mm je proces navyšování hodnoty elektrického proudu obdobný jako v předchozím případě. I u tohoto experimentu bylo zjištěno, že s nižší teplotou a vyšší relativní vlhkostí hodnota elektrického odporu roste. Prudký nárůst nastává při působení 82% relativní vlhkosti. Zatímco u pěny 6 mm byl největší rozdíl při nastavení 35% relativní vlhkosti, u pěny 15 mm je tomu při 82% r.v., což je podmínka, při které druhý vzorek pěny vykazuje největší podobnost během působení různých teplot.

Naopak nejpodobnější výsledky el. odporu byly zaznamenány při nejnižším stupni nastavení relativní vlhkosti. Z grafu je zřejmé, že v době, kdy na vzorek působila 66% relativní vlhkost, došlo k vyvrácení dříve zmíněného tvrzení o vlivu hodnoty teploty a relativní vlhkosti okolí na elektrickou vlastnost PU pěny. V tomto případě je hodnota elektrického odporu PU pěny, na kterou působí vyšší teplota, vyšší než u pěny vystavené nižšímu tepelnému působení.

Hodnota elektrického odporu PU pěny 15 mm se vlivem rostoucí relativní vlhkosti při působení teploty 22°C navýšila o 215%. V případě působení teploty 37°C na stejný vzorek byl elektrický odpor navýšen o 194%.

Shrnutí

Lze tedy říci, že s rostoucí relativní vlhkostí a snižující se teplotou vykazuje PU pěna vyšší elektrický odpor. Tento růst je nelineární.

Při porovnání obou vzorků při působení obou teplot docházíme k závěru, že největší hodnotu elektrického odporu vykazovala PU pěna 15 mm (395,71 kΩ) při působení teploty 22°C a relativní vlhkosti 98%. U tohoto vzorku byla zaznamenána také nejnižší hodnota elektrického odporu (125,45 kΩ), ovšem ta vznikla při působení teploty 37°C a relativní vlhkosti 35%. V tabulce 11 je uveden procentuální nárůst elektrického odporu PU pěn během změny hodnoty relativní vlhkosti a teploty okolí.

Procentuální vyjádření hodnot elektrického odporu PU pěn získaných měření		
Teplota	Pěna 6 mm	Pěna 15 mm
22°C	70%	215,4%
37°C	97,76%	194,33%

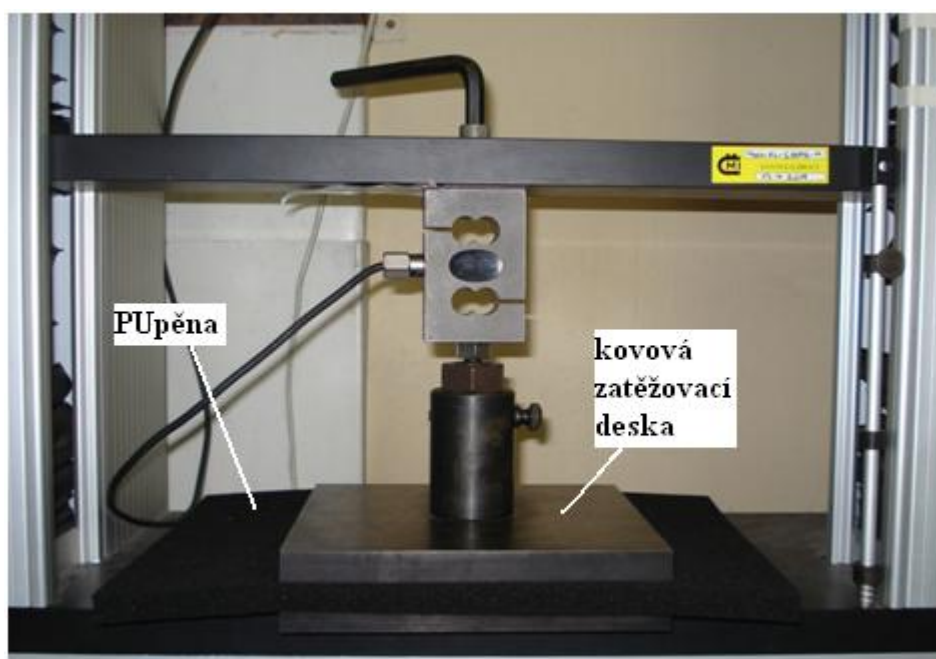
Tab. 11: Procentuální vyjádření rozdílu získaných hodnot elektrického odporu PU pěn při teplotě okolí 22°C a 37°C v závislosti na změně relativní vlhkosti

5.4. Stanovení relaxace napětí PU pěny

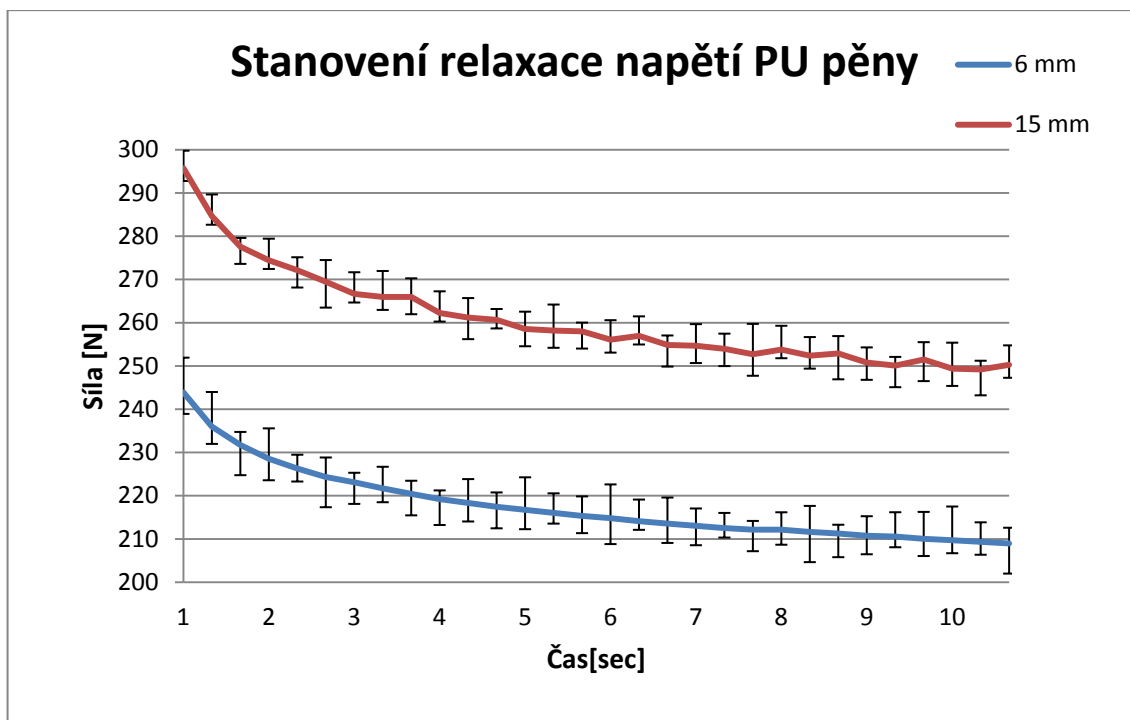
Relaxace napětí je změna napětí při konstantní deformaci v závislosti na čase. Viskoelastické látky reagují na mechanické namáhání vždy s určitým zpožděním. Časová prodleva závisí na uspořádání řetězců v polymerní látce. [13]

Postup měření

Zkouška probíhala na zkušebním zařízení Labtest 2.050, kde byl vzorek vodivé PU pěny vložen mezi kovové čelisti (zatěžovací desku a podložku) trhačího stroje. Na pěnu působila zatěžovací síla 300 N, která způsobila její 80% deformaci. Jelikož během této zkoušky nebyl měřen elektrický odpor, nebyl přímý kontakt vodivé PU pěny s kovovou plochou překážkou. Detail uspořádání vzorku během měření je patrný z obrázku 5.2. Naměřené průměrné hodnoty stanovení relaxace napětí jsou vyneseny v grafu 7.



Obr. 5.2: Uspořádání experimentu stanovení relaxace napětí PU pěny



Graf 7: Porovnání relaxace napětí pěny 6 mm a 15 mm

Výsledkem tohoto experimentu je pokles hodnoty napětí polyuretanové pěny v čase. Pokles je dán přetvářením struktury PU při konstantním zatížení. Díky materiálovému složení vykazují pěny ustálení napětí až po delším čase. To znamená, že je nutno vzorek zatěžovat minimálně po dobu 10 minut. Průběh relaxace je bez ohledu na tuhost pěny velmi podobný. Z grafu 7 je patrné, že vyšších hodnot síly dosahuje pěna o tloušťce 15mm. V tomto případě také docházelo ke kolísání hodnot, což druhý vzorek nevykazoval. V tabulce 12 je uveden pokles hodnot napětí pěn v procentech.

Pokles hodnot napětí v závislosti na době stlačení PU pěn	
Pěna 6 mm	Pěna 15 mm
-14,31%	-15,38%

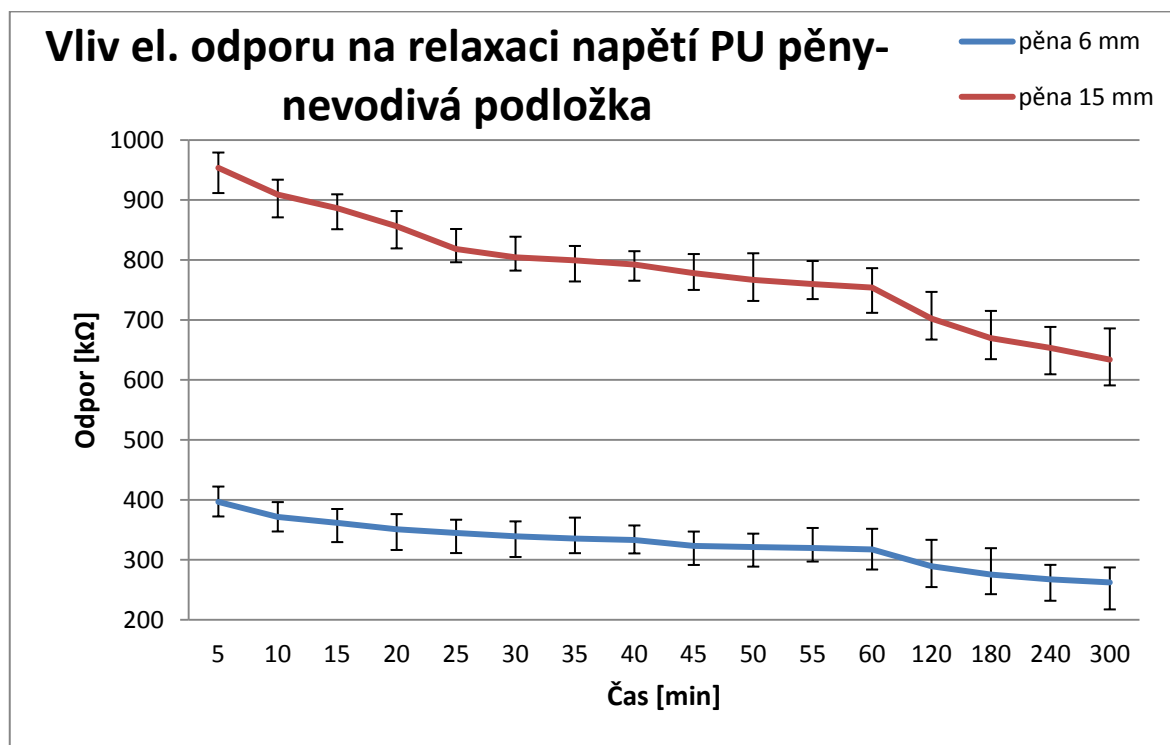
Tab. 12: Procentuální vyjádření rozdílu získaných hodnot napětí PU pěn v závislosti na době zatížení

5.5. Stanovení vlivu relaxace napětí PU pěny na hodnotu el. odporu

Tento test měl za úkol zjistit, jak se mění hodnota elektrického odporu pěny během dlouhodobého zatížení.

Postup měření

Experiment spočíval v zatížení vzorku elektricky vodivé PU pěny plochou kovovou deskou. Uspořádání materiálu během měření je graficky znázorněno na obrázku 4.12 v kapitole 4.6.3. Elektrický odpor byl měřen po dobu 300 minut. V první hodině měření byla hodnota elektrického odporu zaznamenána vždy po 5 minutách, dále pak po hodině. Průměrné hodnoty elektrického odporu PU pěn jsou porovnány v grafu č. 8.



Graf 8: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 6 mm a 15 mm během dlouhodobého zatížení

Elektrický odpor zatížené PU pěny byl zaznamenáván po dobu 300 minut. Výsledky měření jsou vyneseny v grafu 8. Stejně jako u stanovení relaxace napětí na trhačím stroji Labtest 2.050, i v tomto případě mají křivky obou pěn velmi podobný průběh, pokles pěny o tloušťce 15 mm je mírně strmější.

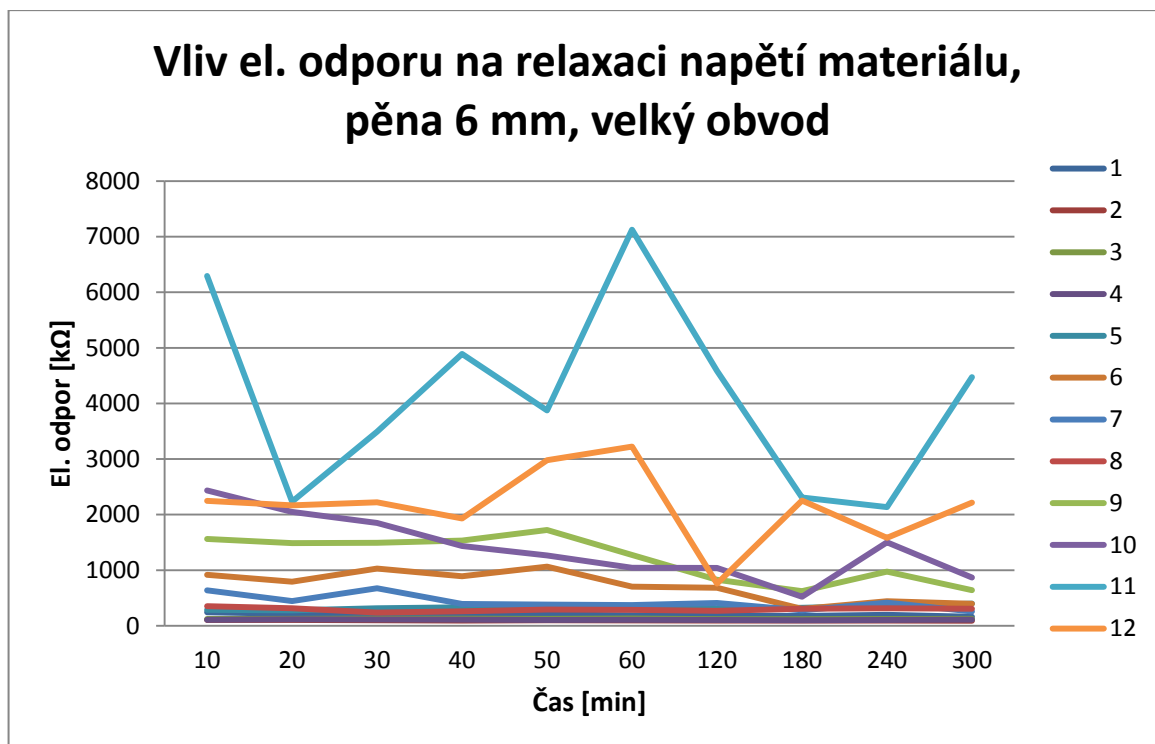
S rostoucí dobou zatížení hodnota elektrického odporu klesá. V případě pěny 6 mm je o pokles v první hodině pozvolnější, než ve stejném časovém úseku u pěny 15 mm, kde v čase 25 min došlo k výraznému poklesu měřené veličiny. Výsledky relaxace napětí polyuretanové pěny by měly být po desetiminutovém zatížení ustáleny. Z grafu lze vyčíst, že u obou pěn, bez ohledu na jejich tuhost, k ustálení nedošlo a hodnota elektrického odporu klesala až do konce měření. Lze tedy předpokládat, že by k tomuto poklesu docházelo i v dalších hodinách.

5.6. Výběr vhodné snímací elektrody

Jak již bylo uvedeno, pro návrh vhodného čidla, byla zhotovena testovací deska s různě uspořádanými elektrodami. Čidla jsou na desce sestavena ve dvou obvodech (viz. obr. 4.7). Jejich úkolem má být snímání kontaktního tlaku, který je vytvořen zátěží lidského těla na matraci. Na snímací elektrody je kladen požadavek stability, což znamená, že snímač musí odolávat vnějším vlivům a nesmí u něj docházet ke změnám vodivosti. Detail testovací desky je vyobrazen a podrobně popsán v kapitole 4.2.

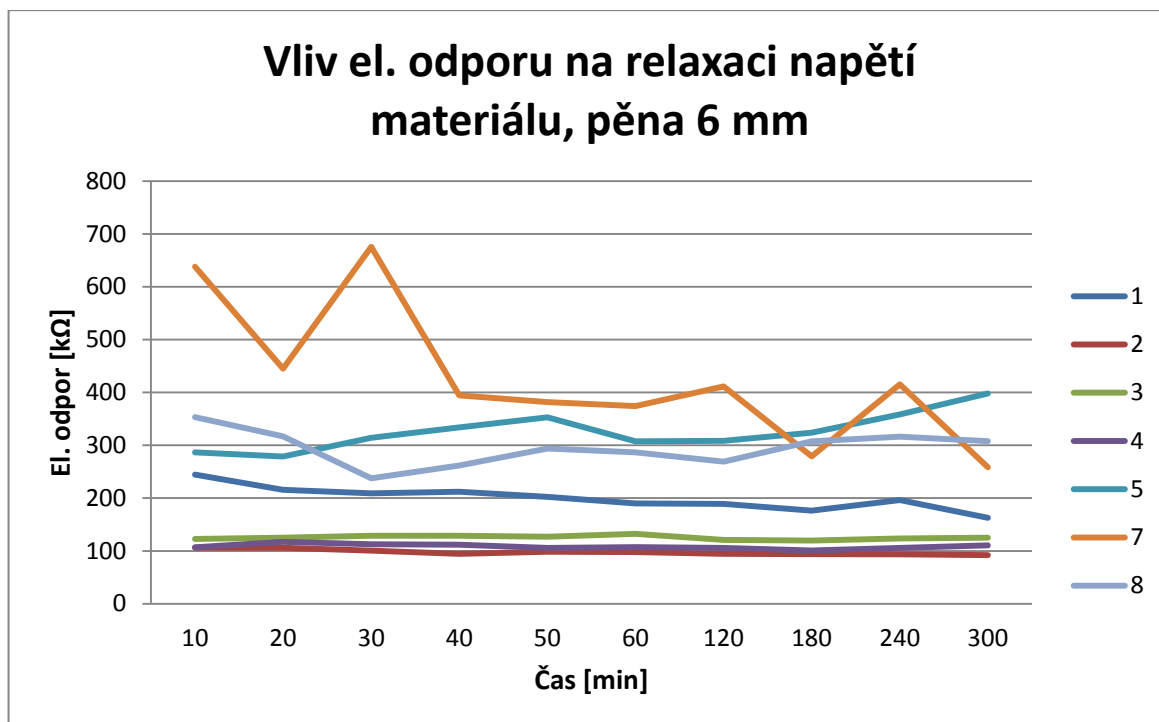
Postup měření

Na testovací desku (tištěný spoj) byla položena elektricky vodivá PU pěna zatížená plochou kovovou zátěží (uspořádání 5.1.3.3). Mezi zátěž a testovací vzorek byla vložena paropropustná membrána. Elektrický odpor byl měřen po dobu 300 minut. V první hodině měření byla hodnota elektrického odporu zaznamenána vždy po 10 minutách, dále pak po hodině. Hodnoty elektrického odporu každé pěny jsou dále vyneseny v grafech 9, 10, 11, 12, 13 a 14.



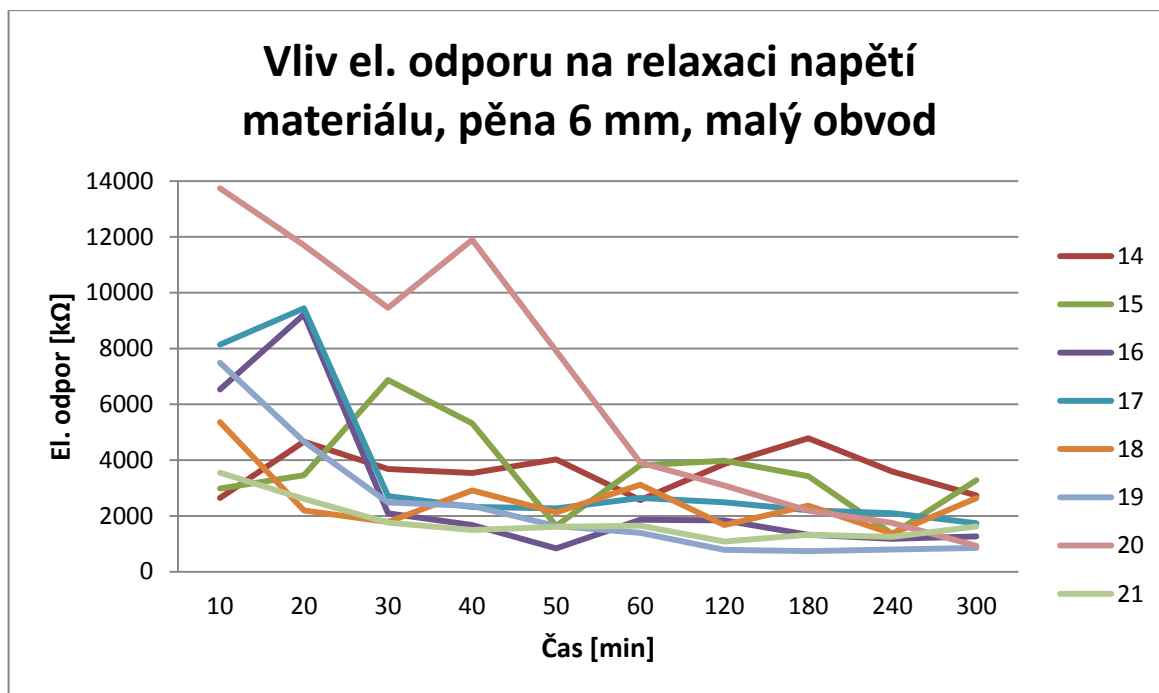
Graf 9: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 6 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do velkého obvodu

Graf 9 porovnává hodnoty elektrického odporu získané pomocí snímacích elektrod velkého obvodu testovací desky. Z grafu je patrné, že elektrody 6, 9, 10, 11 a 12 vykazují kolísání a tedy nestabilní hodnoty, proto takové provedení snímačů v praxi nelze použít. Dle obrázku 4.7 je zřejmé, že se jedná o elektrody větších rozměrů (délka a vzdálenost) bez povrchové úpravy. Největší nestabilita byla zaznamenána u snímače 11. Výsledky stabilních hodnot elektrického odporu jsou vyneseny odděleně v grafu 11, jelikož jejich průběh není v tomto grafu příliš patrný.



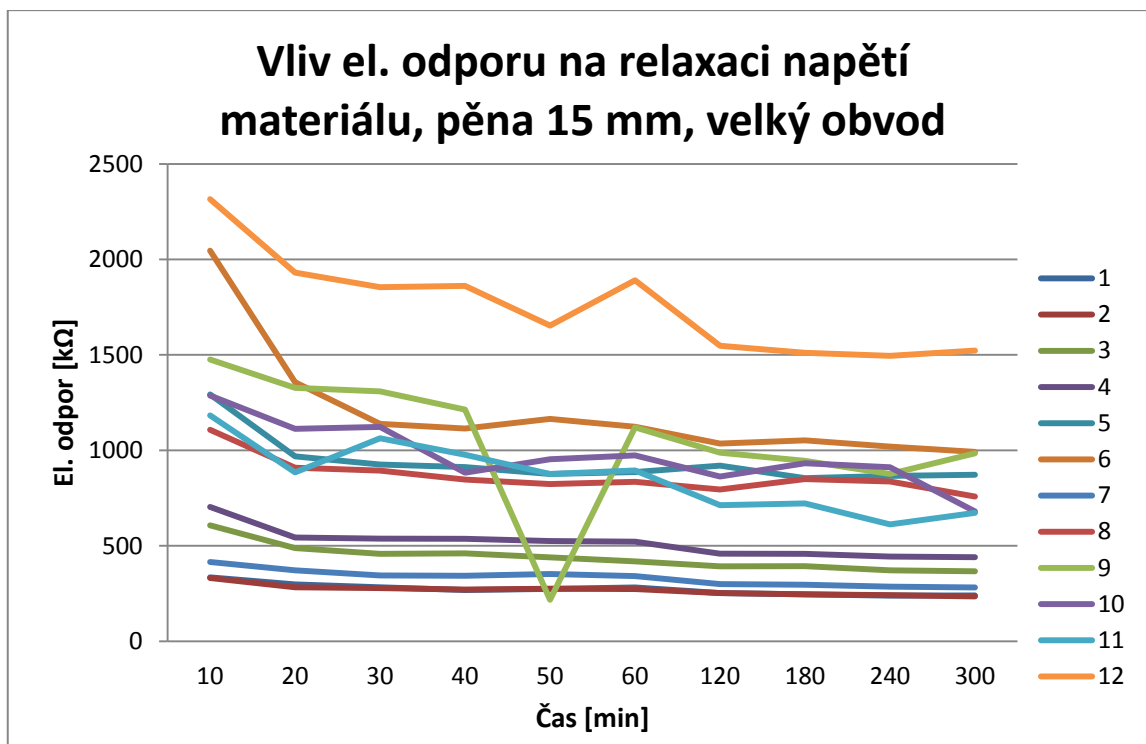
Graf 10: Porovnání stabilních hodnot elektrického odporu pěny 6 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do velkého obvodu

Graf 10 zobrazuje kvalitu snímacích elektrod uspořádaných do velkého obvodu. Nejpodobnější a nejstabilnější výsledky byly zaznamenány v případě snímače 2 a 4. Jedná se o elektrody s povrchovou úpravou velikosti 25 x 3 mm a 25 x 4 mm, přičemž první číslo udává délku a druhé šířku snímače. V obou případech jsou od sebe jednotlivé snímače tvořící pár vzdáleny 25 mm. Z grafu je patrné, že v případě ostatních snímacích elektrod docházelo ke kolísání hodnot elektrického odporu PU pěny, přičemž nejzřetelnější vykazovala elektroda 7. U snímací elektrody 5 byl zaznamenán opačný průběh křivky elektrického odporu, zatížené PU pěny, závislého na čase. To znamená, že v tomto případě hodnota měřené veličiny vlivem zatížení stoupala, což není možné.



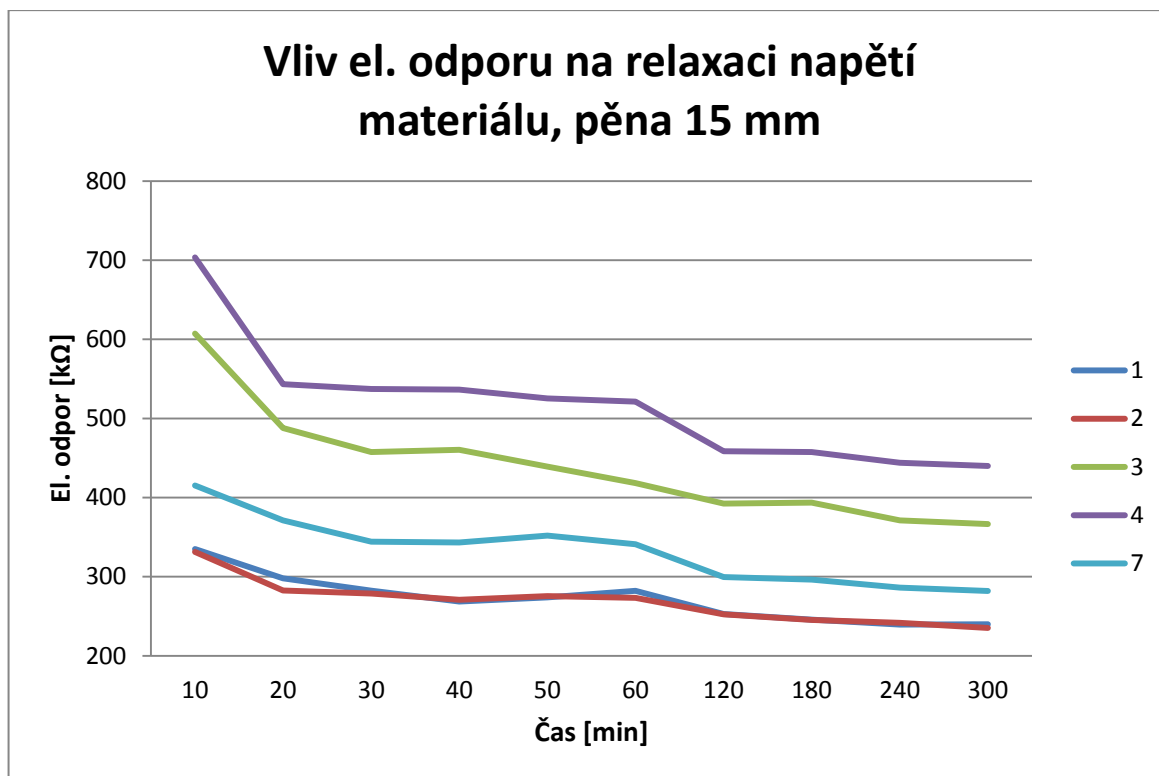
Graf 11: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 6 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do malého obvodu

V grafu 11 jsou vyneseny hodnoty elektrického odporu PU pěny 6 mm získané snímacími elektrodami bez povrchové úpravy uspořádanými do malého obvodu (obr. 4.7). Vzdálenost mezi párovými elektrodami je 13 mm. Z pohledu na kolísání hodnoty elektrického odporu, je zřejmé, že praktické využití nepřipadá v úvahu u žádného z navržených čidel. Nejnestabilnější hodnota byla zaznamenána u snímací elektrody 20. V tomto případě došlo také k největšímu poklesu elektrického odporu PU pěny během měření, a to o 93,22%.



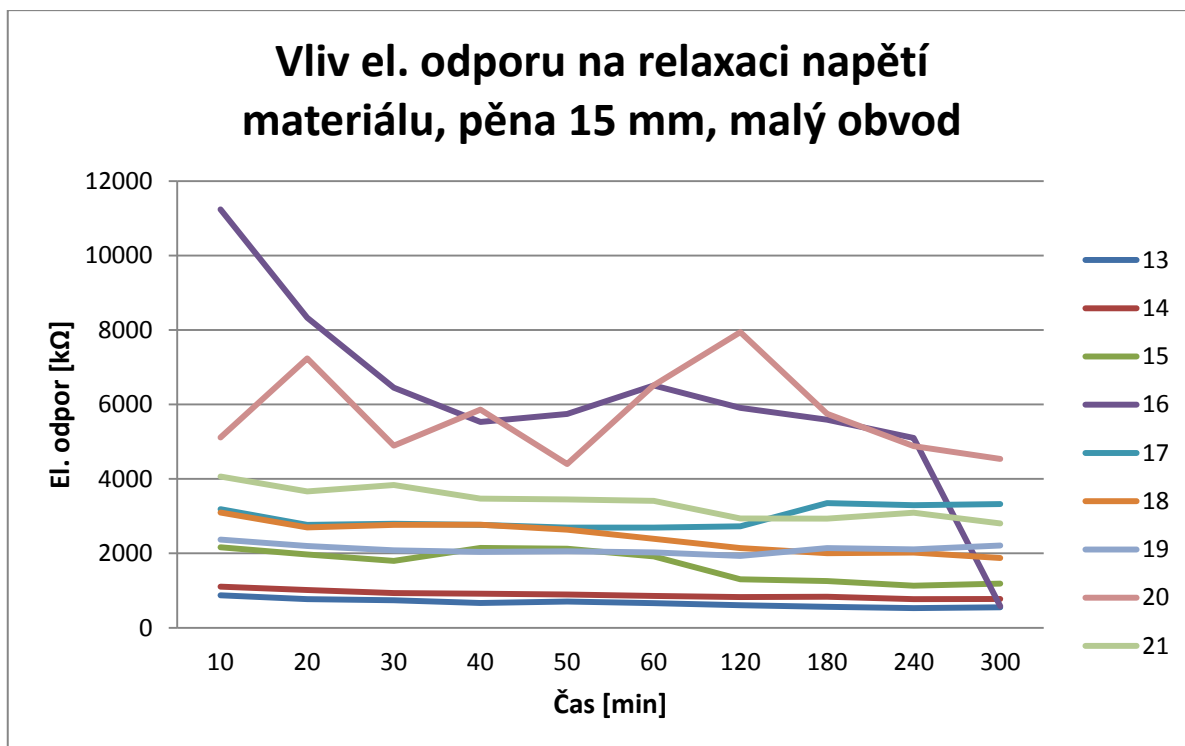
Graf 12: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 15 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do velkého obvodu

Graf 12 znázorňuje výsledky elektrického odporu zatížené PU pěny 15 mm získané měřením snímacích elektrod velkého obvodu na testovací desce. Na první pohled je patrné, že snímací elektrody vykazovaly během měření PU pěny 15 mm stabilnější hodnoty než u pěny 6 mm. Ovšem i v tomto případě docházelo ke kolísání měřené veličiny. Největší výchylka byla zaznamenána u měděné elektrody 9, kdy v čase 50 min došlo k rapidnímu poklesu. Křivky ve spodní úrovni grafu vykazují stabilní hodnoty a pro větší přehlednost jsou vyneseny v grafu 13.



*Graf 13: Porovnání stabilních hodnot elektrického odporu pěny 15 mm
během dlouhodobého*

V tomto grafu jsou vyneseny hodnoty elektrického odporu zatížené PU pěny 15 mm. Tyto výsledky se v předchozím grafu jeví jako relativně stabilní, bez výrazného kolísání. Nejlepších výsledků bylo dosaženo použitím snímacích elektrod 1 a 2. Tyto hodnoty také vykazují významnou vzájemnou podobnost. Ovšem i v tomto případě je zaznamenána lehká výchylka a to: u elektrody 1 v čase měření 60 min a u elektrody 2 v čase 20 min. Ve zbylém časovém úseku se měření jeví jako stabilní. Snímací elektroda 1 je měděná, bez povrchové úpravy. Povrch snímací elektrody 2 je opatřen vrstvou cínu.



Graf 14: Porovnání hodnot elektrického odporu pěny 15 mm získaného během dlouhodobého zatížení z jednotlivých snímacích elektrod navržených na testovací desce a uspořádaných do malého obvodu

Graf porovnává stabilitu hodnot elektrického odporu PU pěny 15 mm získanou měřením snímacích elektrod uspořádaných v malém obvodu testovací desky. Snímače bez povrchové úpravy 13 a 14 vykazují stabilní hodnoty elektrického odporu zatížené PU pěny 15 mm. V ostatních případech je zaznamenáno zřetelné kolísání měřených hodnot a u snímače 17 je patrný růst hodnoty elektrického odporu PU pěny během zatěžování. Z grafu je patrné, že nejhorších výsledků stability dosahuje snímací elektroda 16 a 20. Hodnoty elektrického odporu PU pěny získané těmito snímači se pohybují řádově výše v porovnání s ostatními.

Shrnutí

Nejstabilnějších hodnot elektrického odporu PU pěn bylo dosaženo použitím čidel 2, 3, 4 a v případě měření el. odporu PU pěny 15 mm snímače 13 a 14. Elektrody 2, 3 a 4 jsou opatřeny vrstvou cínu, mají nižší povrchový odpor a jsou nad desku mírně vyvýšeny. To znamená, že v tomto případě dochází k lepšímu kontaktu povrchu PU pěny s elektrodou než u snímačů bez povrchové úpravy. Měděné elektrody 13 a 14 nelze považovat za použitelné, jelikož vykazovaly stabilní naměřené hodnoty pouze během experimentu vzorku pěny 15 mm.

Během měření pomocí snímacích elektrod uspořádaných do malého obvodu testovací desky bylo náročné zaznamenat hodnoty elektrického odporu PU pěn – měřená veličina vykazovala rychlé výchylky řádově v desítkách k Ω .

Při porovnání experimentu provedeného na obou typech pěn je z grafů zřetelné, že pěna 15 mm vykazovala stabilnější a tedy lepší hodnoty elektrického odporu. Pro praktické použití je tento typ pěny tedy vhodnější. Lze říci, že větší tloušťka znamená větší odolnost vůči zatížení.

6. Diskuse a návrh

Elektrické a mechanické vlastnosti vodivé PU pěny

Závislost elektrického odporu na deformaci PU pěny:

Experiment (kap. 5.2) probíhal na trhacím stroji Labtest 2.050, kde byl vzorek zatěžován pohyblivou částí stroje v pěti krocích. Při každém následujícím kroku byla hodnota deformace zvýšena o 20% a poté udržována po dobu pěti minut, přičemž byla zaznamenána průměrná hodnota elektrického odporu po dobu 30 vteřin a to: ihned po zatížení, po 2 minutách a po 4,5 minutách. Poté se deformace zvýšila o 20% a měření probíhalo dále stejným způsobem. Na základě tohoto experimentu bylo zjištěno, že hodnota elektrického odporu se zvyšující deformací klesá. To je dáno charakterem PU pěny. Během stlačení pěny dochází k deformaci její struktury, stěny buněk se přiblíží k sobě. Čím blíže jsou částice uhlíku u sebe, tím menší je prostor dielektrika mezi nimi, což znamená, že i hodnota elektrického odporu materiálu se snižuje.

Závislost odporu PU pěny na teplotě okolí:

Předmětem tohoto experimentu (kap. 5.3) bylo zjistit, jak elektrický odpor vodivé PU pěny reaguje na změny teploty okolí. Zatížený vzorek byl umístěn do teplovzdušné komory a vystaven působení teplot 25, 30, 35, 40 a 45°C. Uvedené hodnoty teplot představují klimatické podmínky, ve kterých se bude pěna jako součást čidla pro snímání kontaktního tlaku nacházet. Výsledkem zkoušky je, že s rostoucí teplotou okolí PU pěny dochází k poklesu hodnoty elektrického odporu. To je dáno materiálovým charakterem PU pěny. Uhlík obsažený v PU pěně, jakožto vodivý prvek vyniká svou dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Na základě tohoto experimentu lze konstatovat, že reaguje na zvýšenou teplotu snížením elektrického odporu, tj. zvýšením vodivosti.

Závislost odporu PU pěny na teplotě a relativní vlhkosti okolí:

Vzhledem k povaze měřené veličiny lze očekávat, že na výsledky bude mít vliv také relativní vlhkost okolí PU pěny a pěny samotné. Z toho důvodu byl proveden experiment, kdy na vzorek působila stabilní teplota, a docházelo ke změně relativní vlhkosti okolí. Během této zkoušky (kap. 5.4) byl zatížený vzorek vystavován změně relativní vlhkosti okolí při působení teploty 22°C a 37°C. Zkouška probíhala v klimatizační zkušební skřini. Teplota 22°C charakterizuje přibližnou teplotu místnosti, čili stav nezahřáté pěny. Teplota 37°C simuluje stav pěny, která je zahřátá lidským organismem. Celkem bylo aplikováno 5 relativních vlhkostí v rozsahu 35~98%. Tento rozsah je dán možnostmi nastavení použitého zkušebního zařízení. Díky tomuto experimentu bylo zjištěno, že s rostoucí relativní vlhkostí elektrický odpor vodivé PU pěny roste. Vyšší hodnoty byly zaznamenány během působení nižší teploty, což je v souladu s tvrzením u předešlé zkoušky. Vezmeme-li v potaz, že vlhkost je voda ve formě vodní páry obsažená ve vzduchu, pak můžeme říct, že vlastností vodní páry je elektrická vodivost, respektive velmi slabá elektrická vodivost, která je nižší než vodivost uhlíku. Tento jev lze vysvětlit tím, že voda, která je v pěně obsažena, se chová jako další, sériově zapojený odpor, tedy se zvýší celkový odpor v PU pěně, popř. dojde k tomu, že voda vázaná na povrchu pěny, sníží její povrchovou vodivost, tedy zvýší i odpor mezi elektrodou a pěnou. Z toho vyplývá, že s rostoucí vlhkostí roste elektrický odpor PU pěny. Tento jev lze vyčíst z grafu č. 5.

Stanovení relaxace napětí PU pěny:

Tento experiment byl proveden z důvodu zjištění změny napětí při konstantní deformaci (80%) v závislosti na čase (10 min). Zkouška byla provedena na trhacím stroji Labtest 2.050. Viskoelastické látky reagují na mechanické vlivy vždy s určitým zpožděním. Z toho důvodu měření probíhalo po dobu 10 minut, což je předpokládáný dostatečný čas potřebný k ustálení hodnot napětí PU pěny. Pěna byla stlačena o 80% své původní tloušťky. Výsledkem této zkoušky je pokles hodnoty síly napětí zatížené pěny v čase.

Vliv relaxace napětí PU pěny na hodnotu elektrického odporu:

Jelikož byl materiál navržený pro zdravotnické účely, kdy bude vystavován dlouhodobému tlaku, byl proveden experiment, jehož cílem bylo zjistit právě vliv dlouhodobého zatížení PU pěny na elektrický odpor. Vzorek byl zatížen po dobu 300 min, přičemž hodnota elektrického odporu byla zaznamenávána v prvních 60ti minutách po 5ti minutách a dále pak po 60ti minutách. Díky tomuto experimentu došlo k vyvrácení tvrzení o ustálení hodnot napětí PU pěny během 10 min. Bez ohledu na tuhost jednotlivých pěn nedošlo k ustálení, jejich hodnota elektrického odporu klesala až do samého konce zkoušky. Toto měření bylo dostatečně dlouhé, aby k ustálení hodnot elektrického odporu zatížené PU pěny došlo. Díky předešlým zkouškám bylo možno konstatovat, že pro praktické použití bude vhodnější PU pěna 15 mm a to z toho důvodu, že vykazovala větší odolnost vůči zatížení, danou větší tloušťkou materiálu. Na základě tohoto experimentu lze podotknout, že vybraný materiál nemusí být pro požadované účely zcela vhodný. A to právě z toho důvodu, že materiál vykazuje nestabilní hodnoty elektrického odporu při působícím dlouhodobém zatížení. U pěny tedy nedochází k ustálení změn způsobených mechanickým namáháním, což nesplňuje výše uvedené požadavky kladené na materiál vhodný pro bezkontaktní snímání kontaktního tlaku. Tento nežádoucí jev také mohla způsobit nestabilita kontaktu PU pěny s elektrodami.

Výběr vhodného uspořádání snímače

Druhá část experimentu se zabývala návrhem vhodné snímací elektrody. Pro tento účel byla zhotovena testovací deska (obr. 4.7) v podobě tištěného spoje s párově uspořádanými elektrodami, které se liší rozměry a rozestupy mezi sebou a také použitým materiálem elektrod. Některé elektrody jsou opatřeny vrstvou cínu, ostatní mají základní materiálovou podobu (měď). Kvalita těchto navržených čidel byla posuzována experimentem, při kterém byla PU pěna dlouhodobě zatěžována (300 min). V prvních 60ti minutách byla hodnota elektrického odporu PU pěny zaznamenána vždy po 10 min, dále pak po dalších 60 min. Tímto způsobem byla zaznamenávána hodnota měřené veličiny pomocí každého z navržených čidel.

Úkolem navržené elektrody je snímání kontaktního tlaku. Kontrolou tohoto tlaku lze předejít vzniku proleženině u pacienta. Znamená to tedy, že na snímač je v první řadě kladen požadavek vysoké stability, přesnosti a citlivosti. Na základě tohoto experimentu bylo zjištěno, že žádná z navržených snímacích elektrod není vhodná ke zmíněnému účelu. Hodnoty získané měřením byly dobře čitelné, ale měření bylo nereprodukovatelné, jelikož docházelo ke značnému kolísání elektrického odporu PU pěny. Relativně stabilní hodnoty byly zaznamenány u povrchově upravených elektrody 2 a 3. Pojem „relativně“ byl použit vzhledem k výsledkům získaných pomocí ostatních elektrod, jež vykazují značné kolísání hodnot elektrického odporu PU pěny řádově o 100%. Přesto zde platí, že stabilnějších hodnot bylo dosaženo použitím PU pěny 15 mm, tedy materiálu větší tloušťky.

Faktory ovlivňující kvalitu snímacích elektrod:

Závěrem je možno konstatovat, že použití elektrod tohoto typu není vhodné, jelikož měď i cín má sklon k oxidaci a tedy by nebylo možno dlouhodobě udržet stabilitu čidla. Oxidací dochází ke změně povrchové vodivosti. Je tedy nutno zvolit materiál, který nepodléhá korozi. Dalším zjištěním je, že i když je pěna značně pružná, nedochází k dobrému kontaktu její plochy se snímacími elektrodami. Znamená to, že snímač musí být jinak prostorově řešen.

Výše uvedené důvody zabránily konečnému návrhu a rozhodnutí o konkrétním charakteru snímací elektrody. Návrh lze provést teoreticky, s ohledem na získané informace.

Návrh vhodné snímací elektrody:

Aby snímací elektroda vykazovala stabilní hodnoty a tedy byla vhodná pro praktické použití, je potřeba zvýšit výšku elektrod, aby došlo k dobrému kontaktu s plochou pěny a provést pokovení měděných elektrod, např. galvanicky. Pokovení musí být realizováno pomocí takového materiálu, který nepodléhá vlivům okolí (zejména oxidaci). Levnou alternativu vzhledem k minimální potřebné vrstvě představuje například zlato.

7. Závěr

Práce byla zaměřena na návrh čidla pro měření tlaku v hyperplastických materiálech. Čidlo sestavené z PU pěny a desky s rozmístěnými snímacími elektrodami, bude sloužit jako doplněk pro prevenci vzniku proleženin u pacienta s poškozeným pohybovým aparátem. Polyuretanová pěna byla vybrána na základě materiálové rešerše zaměřené na schopnost materiálu odolávat mechanickým vlivům a po zatížení se vrátit do svého původního tvaru. Jako předpokládaný vhodný materiál pro tyto účely byla pěna zvolena z důvodu snadné dostupnosti a nízké tuhosti v porovnání s ostatními materiály. Jelikož materiál bude snímat hodnotu tlaku charakterizovanou elektrickou veličinou, je nutné zvýšení vodivosti pěny. Jako zkušební vzorek pro experimentální část byla použita vodivá PU pěna o tloušťce 6 a 15 mm. Její vodivost byla získána rozptýlením částic uhlíku do materiálové směsi.

Jako veličina charakterizující deformaci byl zvolen elektrický odpor a to z důvodu nenáročného získání jeho hodnot z hlediska zpracovatelnosti dat i běžnými komerčně dostupnými přístroji. K získávání hodnot měřené veličiny byl použit multimetr Fluke 187. Elektrický odpor PU pěny byl snímán pomocí čidel v podobě měděných destiček umístěných na okraji elektricky nevodivé podložky. Uspořádání vzorku pro jednotlivá měření je uvedeno v kapitole 5.1.3.

Experiment lze rozdělit na dvě části:

- Zjišťování vlastností vodivé PU pěny během mechanického namáhání a během změny klimatických podmínek
- Ověřování vlastností navržené snímací elektrody

Díky zkouškám, kdy pěna odolávala mechanickým vlivům, bylo zjištěno, že čím více je vodivá PU pěna deformována (zatížena), tím větší vodivost vykazuje (snižuje se její elektrický odpor). Dále byla pěna vystavována zvyšujícím se teplotám okolí. Na základě tohoto experimentu, který probíhal v horkovzdušné komoře, bylo zjištěno, že teplota má na elektrický odpor pěny stejný vliv, jako v předešlém případě. To znamená, že s rostoucí teplotou se zvyšuje vodivost a tedy klesá elektrický odpor. Lze předpokládat, že na výsledky měřené veličiny bude mít vliv také relativní vlhkost. Z toho důvodu byla

provedena zkouška, kdy byl vzorek vložen do zkušební klimatizační skříně a vystavován zvyšující se relativní vlhkosti. Vodivá pěna na změnu této klimatické podmínky reagovala zvýšením elektrického odporu.

Uvedené reakce během zkoušek jsou dány strukturním a materiálovým charakterem zkoušeného materiálu. Hlavním elementem ovlivňující zkoušené vlastnosti je vodivý uhlík obsažený v materiálové směsi PU pěny.

Pro návrh vhodné snímací elektrody byla vyrobena testovací deska s různě uspořádanými snímači (kap. 4.2). Na základě experimentu, kdy byl elektrický odpor zatížené PU pěny pomocí této desky pravidelně zaznamenáván po dobu 300 minut, bylo možné posoudit kvalitu navržených elektrod. Výsledky získané během tohoto experimentu vykazovaly značné kolísání (až o 100%) a navržené elektrody byly tedy posouzeny jako nevyhovující a tedy nepoužitelné.

Díky této práci bylo zjištěno, že stabilních hodnot měřené veličiny je možno docílit v případě dobrého kontaktu mezi elektrodou a plochou pěny. Toho lze dosáhnout např. zvětšením tloušťky elektrod. Materiál použitý na pokovení musí odolávat atmosférickým vlivům a stárnutí a musí představovat levnou alternativu. Pro tento účel lze použít například zlato.

Rozložení tlaku vlivem působení na jednu elektrodu ovlivňuje vzdálenost mezi elektrodami a tím také jejich konečné uspořádání. Tyto parametry nejsou známy, tudíž nelze provést návrh uspořádání. Pouze teoreticky lze předpokládat, že by snímací elektrody mohly být sestaveny „v řadách“ či „v obrazcích“. Co se týče vzdálenosti mezi jednotlivými elektrodami, lze se inspirovat zařízením XSensor, které slouží ke stejnému účelu. Velikost jednotlivých snímačů je v tomto případě 1 čtverečný palec (25,4 x 25,4 mm).

Kompletní čidlo bude vkládáno pod matraci pacienta. Bude opatřeno senzorem relativní vlhkosti a teplotním čidlem. Podložka bude kontrolovaně snímat kontaktní tlak, což znamená, že při překročení kritické hodnoty, tj 32 mm rtuťového sloupce, přístroj upozorní obsluhu pacienta, že k této situaci došlo a že je nutno změnit polohu ležícího, aby nedošlo k tvorbě proleženiny. Předpokládá se, že snímací elektrody budou vedeny pomocí kabelů do společné řídicí jednotky, která ovládá polohová lůžka.

Další alternativou je přenos dat pomocí rozhraní bluetooth. Zobrazení kontaktních tlaků, upozornění apod. bude vytvořeno pro systém řídicí jednotky polohování lůžka či jako aplikace, např. v prostředí Android pro mobilní telefony a tablety.

8. Použitá literatura

- [1] Měřidla tlaku - Terminologie. 4SN EN 472, 4NI 1996
- [2] Měření tlaku [online]. [cit. 2011-11-06]. Dostupné z WWW:
<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k42-tlak.htm>
- [3] Elektromotor.divoce.cz [online]. 2012 [cit. 2012-01-06]. Dostupné z WWW:
<http://elektromotor.divoce.cz/piezoelektricky-jev-15198/>
- [4] Tlak 4_3629.pdf [online]. [cit. 2011-11-06]. Dostupné z WWW:
http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/Tlak4_36290.pdf
- [5] OMEGA - Tenzometry [online]. [cit. 2011-11-05]. Dostupné z WWW:
<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/StrainGages.html>
- [6] Wheatstoneův můstek [online]. [cit. 2011-11-05]. Dostupné z WWW:
http://www.walter-fendt.de/ph14cz/wheatstone_cz.htm
- [7] Deformační tlakoměry [online]. [cit. 2011-11-05]. Dostupné z WWW:
http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/MT_INaRP/MT-INFOaRP09_Tlak.pdf
- [8] Výroba neoprenu: [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z WWW:
<http://www.stranypotapecske.cz/vystroj/vyroba-neopren.asp?str=200801221114380>
- [9] Neoprén: [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z WWW:
<http://www.rempo.cz/oddeleni/28/Neopren-CR-SBR.aspx>
- [10] Greenwood, NN; Earnshaw, A. (1997) Chemie prvků (2. ed.). Butterworth-Heinemann . věst. 362. ISBN 0080379419 .
- [11] Vodivá PU pěna M02- H- 000 [online]. [cit. 2011-11-08]. Dostupné z WWW:
<http://www.abetec.cz/eshop/product/vodiva-pu-pena-m02-h-000-cerna/>
- [12] Frederick Kipping , LL Lloyd (1901). "XLVII.? Organické deriváty křemíku. Triphenylsilicol a alkyloxysilicon chloridů." J. Chem. Soc., Trans.. 79:.. 449-459
doi : 10.1039/CT9017900449

- [13] Ward, I., M.: The Mechanical Properties of Solid polymers. Wiley 2005
- [14] SEDLÁK, Bedřich; ŠTOLL, Ivan. Elektřina a magnetismus. [s.l.] : [s.n.]. 650 s. ISBN 80-200-1004-1.
- [15] Elektrotechnická měření. 1. vyd. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura, 2002 (2006 tisk). 256 s. ISBN 80-7300-022-9.
- [16] Tarábek, Pavel; Řčervinková, Petra a kolektiv.: Odmaturuj z fyziky, nakladatelství Didaktis 2004, 1. Vydání, Brno
- [17] JL Turner, A. Dalgarno (1977). "Chemie křemíku v mezihvězdných oblacích". Astrophysical Journal 213: 386-389. Bibcode 1977ApJ ... 213 .. 386T . doi : 10.1086/155167 .
- [18] Dow Polyurethanes - Additives Role in Foam Formulations [online] : [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <https://dow-answer.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/5712>.
- [19] ZÁMORSKÝ, Z.: Nauka o makromolekulárních materiálech, syntetické polymery, jejich výroba, struktura a vlastnosti. Brno, 1968.
- [20] Obrázky.cz [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z WWW: http://www.drillspot.com/products/105755/Fluke_187_True_Rms_Multimeter
- [21] XSensor Overview Health: [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z WWW: <http://interface-germany.de/Kunden-ftp/XSENSOR/Datenbl%E4tter%20%2B%20Zeichnungen/X2/XSENSOR%20OverviewHealth1.pdf>
- [22] Tacticle Pressure Measurement: [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z WWW: <http://www.tekscan.com/>
- [23] Fluke 187: [online]. [cit. 2012-04-04]. Dostupné z WWW: <http://www.fluke.com/fluke/czcs/Digitalni-multimetry/Fluke-187-189.htm?PID=56041>
- [24] Kießling/Matthes: Textil- Fachwörterbuch, Berlin 1993, ISBN 3-7949-0546-6, str. 165

- [25] Denninger/Giese: Textil- und Modelexikon, Deutscher Fachverlag Frankfurt/Main 2006, ISBN 3-87150-848-9, str. 287
- [26] Technologie výroby technické pryže: [online]. 2012 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW: <http://www.mn-kk.freepage.cz/nova-stranka-155756/>
- [27] HERRINGTON, R.; HOCK, K.: Flexible Polyurethane Foams. The Dow Chem Co 1998.
- [28] WOODS, G.: Flexible Polyurethane Foams, Chemistry and Technology. Essex, England : Applied Science, 1982.
- [29] Čalounictví - kurz na Katedře hodnocení textilií Technické univerzity v Liberci [online]. [cit. 15. 3. 2010]. URL:<<http://turbo.cdv.tul.cz/course/view.php?id=45>>.
- [30] Flexible Polyurethane Foam [online] : [cit. 2011-02-07]. Dostupné z WWW: <http://www.pfa.org/intouch/new_pdf/lr_IntouchV1.1.pdf [>.
- [31] Testing and Application of New Phenomenological Material Model for Foam Materials [online] : [cit. 2011-01-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.posterus.sk/?p=3923>>.
- [32] Plošné spoje: [online]. 2012 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW: <http://pcb.gatema.cz/plosne-spoje/>
- [33] Záhlava Vít: Návrh a konstrukce desek plošných spojů - principy a pravidla praktického návrhu; nakladatelství BEN - technická literatura, 2010; ISBN 978-80-7300-266-4
- [34] General Catalog A: [online]. 2012 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW: <http://www.analis.be/products/product.asp?idP=29&prodCatg=7634&prod=3542>
- [35] Professur Werkstoffdiagnostik: [online]. 2012 [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW: <http://www2.iw.uni-halle.de/ww/klimapruefschrank.html>

PŘÍLOHA
TABULKY HODNOT ZÍSKANÝCH MĚŘENÍM

Závislost elektrického odporu na deformaci PU pěny

PĚNA 15 mm			
Čas [min]	0-0,3	2-2,5	4,5-5
Deformace [%]	[kΩ]		
20	2348,5	1798,9	1596,2
40	1502,6	1314,8	1258,2
60	1193,2	1038,5	977,2
80	608,2	513,08	486,49

Tab. II: Vliv deformace na elektrický odpor, pěna 15 mm

Stanovení závislosti odporu PU pěny na teplotě

Teplota [°C]		25	30	35	40	45
Pěna 6 mm	[kΩ]	187,67	187,23	185,08	183,26	180,7
Pěna 15 mm		420,68	418,71	417,74	413,24	409,61

Tab. III: Vliv teploty na elektrický odpor

Stanovení závislosti odporu PU pěny na teplotě a relativní vlhkosti

PĚNA 6 mm						
r.v. [%]		35	51	66	82	98
22°C	R [kΩ]	189,5	196,2	227,1	277,6	322,3
37°C		153,19	162,53	201,78	267,38	302,95

Tab. IV: Vliv teploty a relativní vlhkosti na elektrický odpor, pěna 6 mm

PĚNA 15 mm						
r.v. [%]		35	51	66	82	98
22°C	R [kΩ]	125,46	131,29	147,28	242,35	395,71
37°C		120,35	127,1	162,13	198,24	354,23

Tab. V: Vliv teploty a relativní vlhkosti na elektrický odpor, pěna 15 mm

Stanovení relaxace napětí – LabTest 2.050

t [min]	Pěna 6 mm	Pěna 15 mm	t [min]	Pěna 6 mm	Pěna 15 mm
	F [N]			F [N]	
0,33	243,907	295,757	5,33	214,808	256,076
0,66	235,971	284,647	5,66	214,102	256,958
1	231,738	277,592	5,99	213,573	254,842
1,33	228,564	274,418	6,33	213,044	254,665
1,66	226,271	272,125	6,66	212,515	253,96
2	224,331	269,47	6,99	212,162	252,725
2,33	223,097	266,658	7,33	212,162	253,783
2,66	221,686	265,952	7,66	211,633	252,373
3	220,451	265,954	7,99	211,28	252,902
3,33	219,217	262,249	8,33	210,751	250,785
3,66	218,335	261,191	8,66	210,575	250,08
4	217,453	260,662	8,99	210,046	251,491
4,33	216,748	258,545	9,33	209,693	249,374
4,66	216,042	258,193	9,66	209,34	249,198
5	215,337	258,016	9,99	208,988	250,256

Tab. VI: Hodnoty relaxace napětí

Stanovení vlivu relaxace napětí PU pěny na hodnotu elektrického odporu

t [min]	Pěna 6 mm	Pěna 15 mm
	R [kΩ]	
5	396,62	953,6
10	371,48	909,1
15	361,58	886,3
20	350,95	856,3
25	344,79	818,2
30	339,26	804,3
35	335,34	799,2
40	333,03	792,4
45	323,26	778,1
50	321,19	766,7
55	319,66	759,8
60	317,27	753,9
120	289,38	702,8
180	275,54	669,6
240	267,35	653,4
300	262,35	633,9

Tab. VII: Hodnoty elektrického odporu při zkoušce relaxace napětí

Výběr vhodné snímací elektrody

Vliv zatížení materiálu v čase T [min] na jeho hodnotu elektrického odporu R [kΩ] získanou navrženými snímacími elektrodami, Pěna 6 mm										
Snímací elektroda	10	20	30	40	50	60	120	180	240	300
1	244,39	215,83	208,94	211,98	202,48	189,95	189,17	176,21	196,43	162,74
2	106,23	106,08	100,59	94,68	98,41	97,98	94,67	93,82	93,64	91,99
3	122,83	125,17	128,68	128,92	126,92	132,53	120,97	119,61	123,61	125,23
4	106,95	117,29	112,85	11,92	105,86	107,39	105,62	100,96	105,82	110,61
5	286,48	278,57	314,29	333,85	352,83	307,42	308,29	323,86	358,28	398,12
6	918,5	793,1	1028,3	891,5	1064,5	705,5	683,1	303,74	441,91	397,72
7	638,1	444,86	675,4	394,57	381,58	374,25	411,43	279,07	415,31	258,31
8	353,18	316,86	237,58	261,83	293,83	286,72	268,91	307,37	316,32	307,74
9	1562,6	1486,7	1493,2	1532,2	1724,2	1274,1	829,2	624,5	974,4	641,2
10	2434,4	2048,3	1851,3	1436,6	1265,1	1045,1	1042,5	521,86	1500,8	868,9
11	6293	2234,5	3492,8	4890,6	3874,5	7126	4584,9	2308,1	2135,7	4472,8
12	2248,5	2167,5	2220,4	1929,8	2979,5	3224,2	759,8	2254,6	1583,2	2216,4
13	813,6	753,4	786,8	711,2	615,1	504,8	487,53	371,63	444,39	566,7
14	2642,7	4664,2	3683,6	3536,9	4025,7	2572,2	3861,6	4782,6	3591,7	2735,7
15	2984,9	3456,9	6872	5319	1649,5	3812,3	3980,2	3423,9	1356,8	3282,7
6	6532	9221	2093,5	1673,6	837,8	1864,6	1841,2	1325,1	1184,6	1269,8
17	8137	9439	2713,8	2324,1	2270,3	2643,4	2492,3	2202,1	2097,1	1739,1
18	5365	2195,2	1781,7	2913,8	2128,4	3122,4	1675,3	2367,9	1367,9	2638,1
19	7492	4665,1	2481,9	2359,8	1640,9	1397,2	786,7	742,4	800,3	355,3
20	13740	11701	9457	11898	7912	3913,3	3094,3	2193,1	1747,2	930,4
21	3548,2	2612,5	1763,9	1496,6	1613	1651,1	1084,9	1324,6	1253,1	1621,3

Tab. VIII: Hodnoty elektrického odporu při zkoušce relaxace napětí s použitím testovací desky

Vliv zatížení materiálu v čase T [min] na jeho hodnotu elektrického odporu R [kΩ] získanou navrženými snímacími elektrodami, Pěna 15 mm										
Snímací elektroda	10	20	30	40	50	60	120	180	240	300
1	334,92	298,2	282,45	268,59	273,87	282,17	252,73	245,78	239,38	239,82
2	331,39	282,62	278,71	270,73	275,42	273,21	252,34	245,41	241,76	235,24
3	607,2	487,9	457,55	460,44	439,2	418,29	392,43	393,53	371,24	366,45
4	703,5	543,3	537,2	536,4	525,3	521,2	458,45	457,61	443,92	439,87
5	1292,5	968,5	925,9	9102,4	876,1	886,2	919,6	854,7	866,5	872
6	2046,1	1356,3	1138,4	1113,9	1164,2	1123,6	1035,6	1052,3	1019,4	991,5
7	415,23	371,24	344,25	343,24	352,04	340,98	299,62	296,36	286,29	281,92
8	1107,4	908,8	984,2	847,1	823,2	835,2	795,1	849,6	836,8	758,1
9	1475,5	1326,9	1309,2	1213,2	217,5	1120,1	987,3	944,6	876,2	984,6
10	1287,2	1112,9	1122,6	882,9	953,5	973,7	862,9	932,4	911,5	679,6
11	1182,8	884,6	1063,2	976,6	866,3	894,8	712,6	721,8	612,5	672,1
12	2315,9	1931,2	1854,2	1861,3	1853,6	1890,7	1547,6	1510,9	1495,3	1523
13	871,9	771,6	742,1	668,1	707,2	662,9	605,3	563,6	530,9	551,9
14	1105,1	1015,9	934,3	918,5	894,8	857,2	826,38	835,2	769,6	774,2
15	2162,4	1971,6	1799,5	2145,4	2124,3	1918,3	1304,2	1257,3	1130,7	1185,2
16	11240	8329	6451	5530	5745	6512	5909	5589	5098	582,3
17	3184,4	2764,3	2795,6	2766,4	2693,2	2691,3	2726,3	3349,2	3292	3324,5
18	3097,3	2697,2	2763,8	2768,2	2638,2	2390,2	2142,8	2004,5	2023,2	1874,4
19	2371,5	2199,5	2079,8	2039,6	2056,3	2024,8	1932,4	2140,2	2105,4	2210,9
20	5113,2	7236	4895,3	5862	4398,1	6512	7943	5749	4879,2	4535,4
21	4062,3	3665,2	3837,4	3470,8	3450,3	3409,2	2935,4	2932,6	3092	2804,7

Tab. IX: Hodnoty elektrického odporu při zkoušce relaxace napětí s použitím testovací desky